

Системи та технології

(правонаступник наукового журналу
“Вісник Академії митної служби України.
Серія: “Технічні науки”)

№ 2 (68)

Науковий журнал включено до Переліку наукових фахових видань України категорії “Б”, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів з галузі “Технічні науки”, спеціальності 113, 122, 123, 275 (наказ МОН України від 17.03.2020 р. № 409, додаток 1), 172 (наказ МОН України від 24.09.2020 р. № 1188, додаток 5), 241 (наказ МОН України від 26.06.2024 р. № 920, додаток б), 125 – Кібербезпека та захист інформації (наказ МОН України від 25.10.2023 р. № 1309, додаток 4)



Видавничий дім
«Гельветика»
2024

Системи та технології
(правонаступник наукового журналу
“Вісник Академії митної служби України. Серія: “Технічні науки”)
Науковий журнал. Видається двічі на рік. Заснований у травні 1999 р.
Рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет вченою радою
Університету митної справи та фінансів (протокол № 7 від 09.12.2024 р.)

Статті у виданні перевірені на наявність плагіату за допомогою програмного забезпечення
StrikePlagiarism.com від польської компанії Plagiat.pl.

Редакційна колегія:

Кузьменко А. І. – к.т.н., доц.
(головний редактор);
Халіпова Н. В. – к.т.н., доц.
(заступник головного редактора);
Прокопович-Ткаченко Д. І. – к.т.н., доц.
(заступник головного редактора);
Йозеф Костольни – PhD;
Ян Рабчан – PhD;
Бакіров Мюшфік Панах огли – к.т.н.;
Балацька Н. Ю. – д.е.н., доц.;
Бондаренко І. О. – д.т.н., доц.;
Боярчук А. В. – к.т.н., доц.;
Брежнєв Є. В. – д.т.н., с.н.с.;
Вишнікіна О. В. – к.х.н., доц.;
Власов А. В. – к.т.н., ст. досл.;
Волосова Н. М. – к.т.н.;
Гарт Е. Л. – д.ф.-м.н., проф.;
Гордєєв О. О. – к.т.н., доц.;
Джинджоян В. В. – д.е.н., доц.;
Доценко С. І. – д.т.н., доц.;
Защолкін К. В. – к.т.н., доц.;

Котух Є. В. – к.т.н.;
Кузін М. О. – д.т.н., доц.;
Кучер М. М. – к.е.н., доц.;
Мартинюк О. М. – к.т.н., доц.;
Музикін М. І. – к.т.н.;
Нестеренко Г. І. – к.т.н., доц.;
Огар О. М. – д.т.н., проф.;
Охріменко Т. О. – к.т.н.;
Поночовний Ю. Л. – д.т.н., проф.;
Примаченко Г. О. – к.т.н., доц.;
Прохорченко Г. О. – к.т.н., доц.;
Сабіров О. В. – к.т.н., доц.;
Сохацький А. В. – д.т.н., проф.;
Стеблюк Н. Ф. – к.е.н., доц.;
Стеблянко П. О. – д.ф.-м.н.;
Чопоров С. В. – д.т.н., проф.;
Шапорін Р. О. – к.т.н., доц.;
Щербовських С. В. – д.т.н., с.н.с.;
Юдіна О. І. – д.е.н., доц.;
Язіна В. А. – к.е.н.;
Яремчук С. О. – к.т.н.

DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2024-2-68>
ISSN 2521-6643

Коректори: Н. В. Славогородська, Н. С. Ігнатова
Комп'ютерна верстка: Ю. С. Семенченко
Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа: Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
№ 1136 від 11.04.2024 року.

Мови розповсюдження: українська, англійська, польська, німецька, французька, італійська, литовська.
Адреса: м. Дніпро, вул. Володимира Вернадського, 2/4, 49000
Тел.: +38 (099) 729 63 79
E-mail: editor@st.umsf.in.ua
Сайт видання: st.umsf.in.ua

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1
Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08
E-mail: mailbox@helvetica.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 7623 від 22.06.2022 р.

Підписано до друку 10.12.2024. Формат 60×84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 23,02. Обл.-вид. арк. 17,68.
Наклад 100 прим. Замовлення № 1124/802.

ЗМІСТ

ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

Pasichnyk A. M., Nadryhailo T. Zh., Andrieiev O. V. A comprehensive implementation algorithm 2D transformation in graphic web-editors based on the methods of affine transformations.....	7
---	---

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

Булгакова О. Ф., Ульяновська Ю. В., Рябоволенко В. А. Дослідження можливостей Unity для інтеграції геопросторових даних у 3d-моделюванні ландшафтів.....	16
Зінченко А. Ю., Хайдуров В. В. Покращення розпізнавання структурованого тексту нейронною мережею YOLO.....	23
Погребняк А. В., Яковенко В. О., Клим В. Ю., Яковенко Т. Ю. Проблеми інтеграції IoT у комп'ютерні мережі.....	32
Поперешняк С. В., Кравченко Р. В., Новіков Ю. Л. Дослідження методів розпізнавання осіб за біометричними ознаками.....	39
Фірсов О. Д., Маріщук А. В. Нечітка система аналізу бізнес правил предметної області під час створення бази даних.....	48

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Киричек Г. Г., Пестов О. Д., Тягунова М. Ю. Система віддаленого керування об'єктами критичної інфраструктури.....	63
Streltsov O. V., Hryunov M. A., Skalozub V. Yu., Buyukli D. M. Mobile robot navigation based on laser range-metry methods.....	71

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

Козіна Г. Л., Савченко Ю. В., Воскобойник В. О., Прокопович-Ткаченко Д. І. Математичний підхід до підвищення швидкодії програмної реалізації криптоалгоритму SM4.....	78
Прокопович-Ткаченко Д. І. Емерджентно-адаптивний метод оцінки впливу постквантового середовища на інформаційну безпеку держави.....	86
Рибальченко Л. В., Габорець О. А., Прокопович-Ткаченко Д. І. Кіберстійкість: глобальні загрози та національні стратегії кіберзахисту.....	95
Chechet A. S., Chernykh M. V., Panasiuk Ia. S., Abdullin I. I. Front-end security architecture: protection of user data and privacy.....	102

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

Drozhzhyn O. L. IoT in container shipping industry: applications and examples of solutions.....	112
Лебідь В. В., Мейш Ю. А., Копяк Н. В. Статистична оцінка окремих кваліфікацій митних інспекторів при оформленні митних декларацій за функцією бажаності харінгтона.....	121
Nesterenko H. I., Muzykin M. I., Bibik S. I., Strelko O. H., Aleksieieva A. O. Analysis of organizing the delivery of humanitarian aid in crisis situations.....	130

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

Альперт С. І. Новітні методи обробки даних дистанційного зондування Землі.....	140
---	-----

ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННА СПРАВА

Boyko Z. V., Horozhankina N. A., Korneyev M. V., Shcholokova H. V., Umanska S. O. Peculiarities of the development of gastronomic tourism in Georgia.....	147
Kucher M. M., Stebliuk N. F., Haponenko S. O., Razinkova M. Yu., Papsuy K. O. Features of management of operational activities of restaurant enterprises.....	155
Horozhankina N. A., Korneyev M. V., Horb K. M., Tretyak Ye. S. Hostelling at global and national levels.....	161
Yudina O. I., Nebaba N. O., Sabirov O. V., Saihak Ye. L., Altunin K. O. Analysis of competitiveness of enterprises in the restaurant services market.....	168
Yudina O. I., Nebaba N. O., Korneyev M. V., Vyshnikina O. V., Altunin K. O. Trends in the development of the restaurant services market: methods of determination and characteristics.....	176
Яковлева-Мельник Н. Г., Джинджоян В. В. Стандартизація в сфері гостинності – необхідність сучасності й фактор залучення іноземних інвестицій.....	182
Погребняк А. В., Кучер М. М., Сабіров О. В., Гриценко А. В., Зінченко Г. К. Інтеграційний підхід до енергоефективності у проектуванні та будівництві об'єктів готельно-ресторанного бізнесу.....	190

CONTENTS

APPLIED MATHEMATICS

- Pasichnyk A. M., Nadryhailo T. Zh., Andrieiev O. V.** A comprehensive implementation algorithm
2D transformation in graphic web-editors based on the methods of affine transformations.....7

COMPUTER SCIENCES

- Bulhakova O. F., Ulianovska Yu. V., Riabovolenko V. A.** Exploring the potential of Unity for integrating
geospatial data in 3D landscape modeling.....16
- Zinchenko A. Yu., Khaidurov V. V.** Improving structured text recognition with YOLO neural network.....23
- Pohrebniak A. V., Yakovenko V. O., Klym V. Yu., Yakovenko T. Yu.** Challenges of IoT integration
into computer networks.....32
- Popershnyak S. V., Kravchenko R. V., Novikov Yu. L.** Research of personal identification methods
by biometric characters39
- Firsov O. D., Marischuk O. V.** Fuzzy system for analysis of business rules of the subject area
during database creation48

COMPUTER ENGINEERING

- Kyrychek H. H., Pestov O. D., Tiahunova M. Yu.** Remote control system of critical infrastructure objects.....63
- Streltsov O. V., Hrynyov M. A., Skalozub V. Yu., Buyukli D. M.** Mobile robot navigation based on laser
range-metry methods.....71

CYBER SECURITY AND INFORMATION PROTECTION

- Kozina G. L., Savchenko Yu. V., Voskoboinyk V. O., Prokopovich-Tkachenko D. I., Katsiuba V. V.**
Mathematical approach to improving the performance of the programmed implementation
of the SM4 cryptoalgorithm.....78
- Prokopovych-Tkachenko D. I.** Emergent-adaptive method of assessing the impact of the post-quantum
environment on the information security of the state.....86
- Rybalchenko L. V., Haborets O. A., Prokopovych-Tkachenko D. I.** Cyber resilience: global threats
and national cyber defense strategies.....95
- Chechet A. S., Chernykh M. V., Panasiuk Ia. S., Abdullin I. I.** Front-end security architecture: protection
of user data and privacy.....102

TRANSPORT TECHNOLOGIES (BY TYPES)

- Drozhzhyn O. L.** IoT in container shipping industry: applications and examples of solutions.....112
- Lebid V. V., Meish Yu. A., Kopiak N. V.** Statistikal assessment of individual qualifications of customs inspectors
in the processing customs declarations based on the harington desirability function.....121
- Nesterenko H. I., Muzykin M. I., Bibik S. I., Strelko O. H., Aleksieieva A. O.** Analysis of organizing
the delivery of humanitarian aid in crisis situations.....130

TELECOMMUNICATIONS AND RADIO ENGINEERING

- Alpert S. I.** Modern methods of Remote data processing.....140

HOTEL AND CATERING BUSINESS

Boyko Z. V., Horozhankina N. A., Korneyev M. V., Shcholokova H. V., Umanska S. O. Peculiarities of the development of gastronomic tourism in Georgia.....	147
Kucher M. M., Stebliuk N. F., Haponenko S. O., Razinkova M. Yu., Papsuy K. O. Features of management of operational activities of restaurant enterprises.....	155
Horozhankina N. A., Korneyev M. V., Horb K. M., Tretyak Ye. S. Hostelling at global and national levels.....	161
Yudina O. I., Nebaba N. O., Sabirov O. V., Saihak Ye. L., Altunin K. O. Analysis of competitiveness of enterprises in the restaurant services market.....	168
Yudina O. I., Nebaba N. O., Korneyev M. V., Vyshnikina O. V., Altunin K. O. Trends in the development of the restaurant services market: methods of determination and characteristics.....	176
Yakovlieva-Melnyk N. H., Dzhyndzhoian V. V. Standardization in the field of hospitality – the need for modernity and the factor of attracting foreign investments.....	182
Pogrebnyak A. V., Kucher M. M., Sabirov O. V., Grytsenko A. V., Zinchenko H. K. Integrated approach to energy efficiency in design and construction of hotel and restaurant business objects.....	190

ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

УДК 519.6: 004.94

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.1>

Pasichnyk A. M., Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Professor at the Department of Mathematical Modeling and System Analysis
Dniprovsky State Technical University
ORCID: 0000-0002-8561-1374

Nadryhailo T. Zh., Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Mathematical Modeling and System Analysis
Dniprovsky State Technical University
ORCID: 0000-0003-1239-5946

Andrieiev O. V., Graduate student
at the Department of Mathematical Modeling and System Analysis
Dniprovsky State Technical University

A COMPREHENSIVE IMPLEMENTATION ALGORITHM 2D TRANSFORMATION IN GRAPHIC WEB-EDITORS BASED ON THE METHODS OF AFFINE TRANSFORMATIONS

This article presents a complex algorithm for the optimized implementation of 2D transformations in graphic web editors based on the methods of affine transformations.

The object of this study is the algorithms and methods of affine transformations for the implementation of 2D transformations in graphic web editors. The research is aimed at applying the principles of these transformations and their impact on graphic objects, as well as at finding effective solutions for their implementation.

An analysis of the main existing algorithms and methods for implementing 2D transformations, such as the Bresenham and Wu algorithms for visualizing straight and curved lines, algorithms for filling areas using affine transformation methods, was carried out. Therefore, the issue of improving and simplifying algorithms and methods of affine transformations for implementing 2D transformations in graphic web editors is relevant and important for modern web design and development.

The work considers the main algorithms of affine transformations that ensure the implementation of scaling, rotation, shift, skew functions and their interaction with graphic objects. The proposed algorithm includes the main advantages of implementing the above functions and allows you to create more efficient and high-quality graphic applications, providing at the same time greater functionality and productivity. Applying such an approach creates new opportunities for the development and use of new types of web editors in the field of web design.

Based on the proposed algorithm, a web application has been developed that allows you to create various transformations and animations of figures on the plane. The results of the conducted testing confirm the effectiveness and possibility of applying the proposed approach in real projects for the development of graphic web editors for working with 2D transformations.

Key words: affine transformations, graphic editor, 2D transformations, web- editor, transformations in CSS, matrix decomposition.

Пасічник А. М., Надригайло Т. Ж., Андрєєв О. В. Комплексний алгоритм реалізації 2d-трансформацій в графічних веб-редакторах на основі методів афінних перетворень

В даній статті представлено комплексний алгоритм оптимізованої реалізації 2D-трансформацій в графічних веб-редакторах на основі методів афінних перетворень.

Об'єктом даного дослідження є алгоритми та методи афінних перетворень для реалізації 2D-трансформацій у графічних веб-редакторах. Дослідження спрямоване на застосування принципів цих трансформацій та їх впливу на графічні об'єкти, а також на пошук ефективних рішень для їх реалізації.

Проведено аналіз основних існуючих алгоритмів та методів реалізації 2D-трансформацій, таких як алгоритми Брезенгема та Ву для візуалізації прямих та кривих ліній, алгоритми заповнення областей, що використовують методів афінних перетворень. Тому питання удосконалення та спрощення алгоритмів та методів афінних перетворень для реалізації 2D-трансформацій в графічних веб-редакторах є актуальним та важливим для сучасного веб-дизайну та розробки.

© A. M. Pasichnyk, T. Zh. Nadryhailo, O. V. Andrieiev, 2024

В роботі розглянуті основні алгоритми афінних перетворень, що забезпечують реалізацію функцій масштабування, повороту, зсуву, перекосу та їх взаємодію з графічними об'єктами. Запропонований алгоритм включає основні переваги реалізації наведених функцій та дозволяє створювати більш ефективні та високоякісні графічні додатки, забезпечуючи при цьому більшу функціональність та продуктивність. Застосування такого підходу створює нові можливості для розробки та використання нових типів веб-редакторів в галузі веб-дизайну.

На основі запропонованого алгоритму розроблено веб-застосунок за допомогою якого можна створювати різноманітні перетворення та анімації фігур на площині. Результати проведеного тестування підтверджують ефективність та можливість застосування запропонованого підходу у реальних проектах з розробки графічних веб-редакторів для роботи з 2D-трансформаціями.

Ключові слова: афінні перетворення, графічний редактор, 2D трансформації, веб-редактор, перетворення у CSS, декомпозиція матриці.

Formulation of the problem. Affine transformations are a key element of computer graphics, especially in the field of creating and manipulating 2D images and animations. Web-based graphic editors are one of the key tools for creating and sharing digital content on the Internet, such as images, animations, videos, and interactive elements. The effectiveness of the development of relevant editors is determined by the ability to create complex high-quality graphic objects and effects with minimal load on system resources. In this regard, to improve the performance and quality of graphics interpretation in web editors, further improvement and optimization of the use of algorithms and methods of affine transformations for the implementation of 2D transformations are of current and practical importance.

Analysis of recent research and publications. Affine transformations are mathematical operations that allow you to implement image processing with changes in the shape, size, position, and skew of graphic objects in two-dimensional space. They are used in graphic web editors to implement 2D transformations and graphic effects. An affine transformation changes the coordinates of each point of an object by multiplying its coordinates by a transformation matrix and adding a shift vector [1]. The main types of affine transformations are used to scale, rotate, shift, skew, and translate images. At the same time, affine transformations preserve straight lines and parallelism, the distance between points and the middle of a segment, proportions between lengths, and angles between vectors. These properties of affine transformations ensure that objects are resized and positioned correctly in web-based graphic editors.

Most editors use the CSS coordinate space with a two-axis coordinate system: the X-axis increases horizontally to the right; the Y-axis increases vertically downward [2]. To accumulate transformation elements, a local coordinate system is used, where an element actually accumulates all the transformation properties of its predecessors, as well as any local transformation applied to it. The accumulation of these transformations determines the current CTM transformation matrix for the element, which is calculated by multiplying all transformation matrices, starting from the viewport coordinate system and ending with the element transformation matrix [3].

The matrix multiplication algorithm is one of the main methods for implementing affine transformations. This approach is effective and versatile for implementing various types of transformations and is implicitly supported by native web browser tools, which greatly simplifies the development, support, and integration into existing projects with low-level optimization of the algorithms used in this approach [3-5].

To implement linear transformations, such as shift, rotation, and scaling, the Bresenham algorithm, based on the idea of coordinate increment and pixel change based on comparison with certain thresholds, has been widely used. This algorithm is fast and accurate for implementing simple linear transformations [6]. Later, it was generalized to construct second-order curves [7].

There is also a well-known constraint rectangle algorithm used to optimize the image of objects during transformations. The basic idea is to use bounding rectangles (or "bounding rectangles") for each object or group of objects [8]. The use of the constraint rectangle algorithm can improve the performance of displaying complex scenes, especially during object transformations and visualization [9].

The decomposition algorithm is based on classical LU and QR decompositions. Using CSS transformations: CSS (Cascading Style Sheets) provides built-in functions for performing various 2D transformations directly on HTML elements and provides scaling, rotation, shift, and skew transformations. CSS transformations are easy to use, allow you to quickly achieve the desired effect, but their capabilities are limited and more complex transformations may require additional logic and the use of JavaScript [10].

There are also well-known graphic tools such as SVG (Scalable Vector Graphics) and Canvas that implement a number of 2D transformation functions that provide more flexible and detailed control over transformations, including matrix and other operations on individual elements. These libraries usually require the use of JavaScript for the programmatic implementation of transformations and element manipulation [11].

In this paper, to develop effective graphical web editors that provide higher accuracy and performance of image transformations, we propose to use a comprehensive algorithm based on affine transformations that realizes the main advantages of the algorithms mentioned in the above analysis.

The purpose of the article is to develop a comprehensive algorithm for implementing 2D-transformations in graphic web-editors using affine transformations, which includes the main advantages of the above algorithms.

Presenting main material. 1 The web editor developed in accordance with the proposed concept implements the following functionality: adding 4 basic shapes to the canvas: rectangle, triangle, star and ellipse; deleting shapes; each shape has the following attributes: position (offset): along the x and y axes; size: width and height; rotation angle; slope angle; transparency. All attributes are available for change in the properties panel; it is possible to drag, resize, and rotate the figure manually using the appropriate graphical interface elements (manipulator), without entering a specific numerical value in the attribute fields; animation of figures. Animation, in addition to animated values, also contains a delay, duration, and a time-dependent function for realizing various effects and smoothness of animations. The following attributes are available for animation: position (offset): along the x and y axes; scaling: in the horizontal and vertical directions; rotation angle; tilt angle; transparency. Shape animation does not affect the behavior of the manipulator; it can be used to change shape attributes. You can play, reset, and view the total animation time. Shapes are animated separately from each other, but playback and animation time are common to all from the user's point of view.

TypeScript (JavaScript) was chosen to create the graphical web editor because it is a standard for developing client applications and has clear advantages over other technologies.

To optimize the development and deployment of the project, it is proposed to use modern *JavaScript* frameworks such as *Vue*, *React*, and *Angular* [10]. The chosen technologies provide solutions to a number of problems that arise in application development: data reactivity; global application state; architectural problems such as dividing the application into components/modules and code cleanliness; optimization of visualization and re-visualization when making many changes to the DOM; declarative syntax, etc.

Since the program is a graphical editor, it is also important to provide an attractive and user-friendly graphical interface. For the convenience of the graphical interface we chose the *PrimeVue* library, which has a fairly large set of ready-made user interface components, as well as because of its simplicity and rational documentation.

To simplify working with matrices and calculating basic matrix operations, we chose the *mathjs* library. To simplify the creation of animations, we chose the *animejs* library, which has high performance and is a fairly low-level tool for flexible animation of CSS properties and JS objects.

To implement the image of shapes on the canvas, a stylized *div* block is used. The entire component consists of two key blocks: an SVG component that will represent the shape without transformations, and a *div* that prepares it for applying affine transformations to the component. Before proceeding with transformations, you need to build an SVG path for each shape.

In the case of a rectangle, 4 points are defined based on the position and dimensions of the shape: top-left – (0, 0); top-right – (width, 0); bottom-right – (width, height); bottom-left – (0, height). The result is the image shown in Figure 1.

Similarly, for a triangle: top-center – (width / 2, 0); bottom-right – (width, height); bottom-left – (0, height). The result is the image shown in Figure 2.

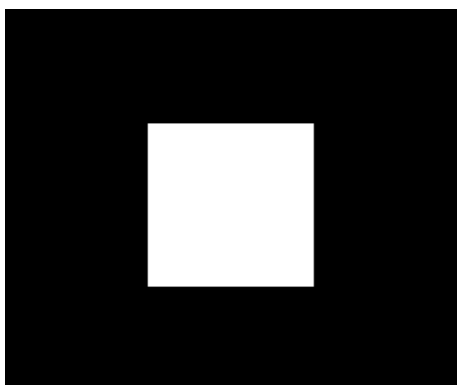


Figure 1. Graphical display of the calculated rectangle

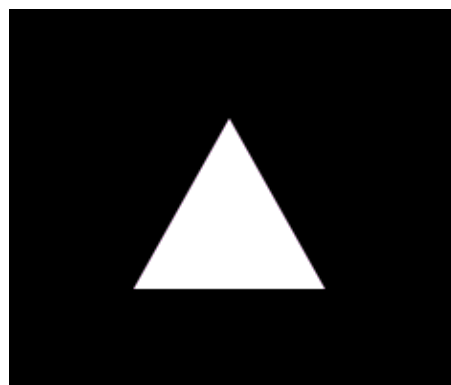


Figure 2. Graphical display of the calculated triangle

In the case of an ellipse, the algorithm will be slightly different, since 2 elliptic curves must be used instead of straight lines according to the algorithm: start at point (0, height / 2); a large elliptic curve with $r_x = width / 2$, $r_y = height / 2$ is introduced at point (width, height / 2); and a large elliptic curve with $r_x = width / 2$, $r_y = height / 2$ at point (0, height / 2).

The result is the image shown in Figure 3.

For a star, the algorithm will be a little more complicated than for other shapes, since you need to correctly calculate the points for all 10 corners of the star.

First, the length of the inscribed circle of the star and its radius are calculated:

$$circumference = \min(width, height), \quad r = \frac{circumference}{2}. \quad (1)$$

Then the scaling factors are calculated, which determine the degree of stretching of the star along the x and y axes:

$$s_x = \frac{width}{circumference}, \quad s_y = \frac{height}{circumference}. \quad (2)$$

The angles for each vertex of the star are calculated using the following formulas:

$$angle_i = i * \frac{\pi}{5} - \frac{\pi}{2}, \quad (3)$$

where i is the index of the star vertex from 0 to 9.

Next, for each vertex angle, the coordinates of the point (x, y) on the circle are calculated and the star is scaled using the following formulas:

$$x_i = (r + r_i * \cos angle_i) * s_x, \quad (4)$$

$$y_i = (r + r_i * \sin angle_i) * s_y, \quad (5)$$

where $r_i = r$ for even values of i (outer vertices) and $r_i = r * 0.382$ for odd values (inner vertices). The value of 0.382 is determined from the condition of proportionality of the indents between the outer and inner vertices of the star. A graphical representation of the star using the algorithm is shown in Figure 4.

All these shapes are SVG paths without transformations.

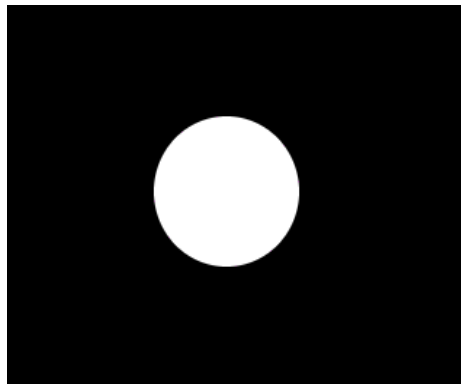


Figure 3. Graphical display of the calculated ellipse

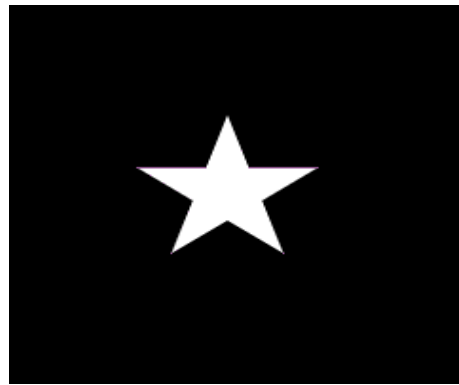


Figure 4. Graphical display of the calculated star

The matrices of individual transformations are defined as follows:

$$translation(x, y) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & x \\ 0 & 1 & y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$scale(x, y) = \begin{pmatrix} x & 0 & 0 \\ 0 & y & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$rotation(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$skew(x, y) = \begin{pmatrix} 1 & \tan x & 0 \\ \tan y & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Since the decomposed components of the transformation matrix are used in a number of calculations, the algorithm for the reverse composition of the decomposed elements is written as follows:

$$TM = translation(x, y) * rotation(\theta) * scale(scaleX, scaleY) * skew(skewX, skewY) \quad (10)$$

To transform the shape attributes into 4 basic ones, first, the position of the shape is transformed as if the origin was in the center of the shape:

$$x_c = x + \frac{width}{2} \quad (11)$$

$$y_c = y + \frac{height}{2} \quad (12)$$

With this choice, all subsequent transformations, except for the shift, will be calculated relative to the center of the shape, and the shape transformation matrix is calculated as follows:

$$TM_s = translation(x_c, y_c) * rotation(\theta_s) * scale(scaleX_s, scaleY_s) * skew(skewX_s, skewY_s) \quad (13)$$

Applying a transformation matrix to shapes is implemented using the CSS *transform* attribute with the value *matrix(a, b, c, d, tx, ty)*.

Since the transformations are calculated relative to the center of the shape, the image block must be shifted by half the horizontal width and half the vertical height.

The next step is to implement a panel for changing shape attributes. On the panel, we need the following attributes: position, size, rotation, skew, and opacity. Also, for the convenience of canceling the values of all attributes, if necessary, the “Clear” button is added. A general view of the attributes panel is shown in Figure 5.

The manipulator is responsible for dragging, resizing, and rotating shapes on the canvas with the mouse, that is, without using the attributes panel. In this case, it is enough to remember the initial position of the component (i.e., at the time of the start of dragging), and then add the mouse offset to it relative to the point of the start of dragging:

$$x_{new} = x_{initial} + x_{mouse} \quad (14)$$

$$y_{new} = y_{initial} + y_{mouse} \quad (15)$$

All shape transformations are taken into account to ensure that the original position of the element is maintained after resizing. Eight “labels” are introduced to resize by dragging in the appropriate directions. To implement the “labels” themselves, you use a regular *div* with the appropriate positioning on the boundaries of the bounding rectangle of the figure for each “label”.

To drag any of the “labels” 2 decomposed transformations are used:

1. The decomposed TM_{shape} matrix without animations, i.e. the shape’s own transformations.
2. The decomposed TM_{full}^{shape} matrix with animations, i.e. the shape transformations overridden by animations at a specific moment in the animation.

The next step is to implement 4 “labels” for the shape rotation, one for each corner of the shape bounding box. To calculate the rotation while dragging the “labels”, you need to save the shape transformation matrix, taking into account the animations at the time of the start of the drag, as well as the initial rotation angle (without animations) and the angles of the shape bounding box, taking into account all the animations.

First, the angles of the shape’s bounding box are calculated. To do this, the transformation matrix is converted to the original coordinate system:

$$TM_{source} = TM_{full} * translation\left(-\frac{width_{full}}{2}, -\frac{height_{full}}{2}\right) \quad (16)$$

and then it is applied to the initial points of the bounding box:

$$\begin{pmatrix} x_{topLeft} \\ y_{topLeft} \\ 1 \end{pmatrix} = TM_{source} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_{topRight} \\ y_{topRight} \\ 1 \end{pmatrix} = TM_{source} \begin{pmatrix} width_{full} \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (17)$$

$$\begin{pmatrix} x_{bottomLeft} \\ y_{bottomLeft} \\ 1 \end{pmatrix} = TM_{source} \begin{pmatrix} 0 \\ height_{full} \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (18)$$

$$\begin{pmatrix} x_{bottomRight} \\ y_{bottomRight} \\ 1 \end{pmatrix} = TM_{source} \begin{pmatrix} width_{full} \\ height_{full} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Next an algorithm for calculating the new angle of rotation of the shape each time you drag the “label” is implemented:

1. The position of the dragged mark is determined from the previously calculated manipulator angles.
2. Calculates the position of the “label” without taking into account the offset:

$$\begin{pmatrix} x_{origin} \\ y_{origin} \\ 1 \end{pmatrix} = translation(-x_{full}, -y_{full}) \begin{pmatrix} x_{handle} \\ y_{handle} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (20)$$

3. The current angle is found relative to the dragged point. The function $atan2(y, x)$ returns the angle between the positive x -axis and the ray from $(0, 0)$ to (x, y) :

$$angle_{current} = atan2(y_{origin}, x_{origin}). \quad (21)$$

4. The new angle is found relative to the dragged point, taking into account the mouse offset:

$$angle_{new} = atan2(y_{origin} + y_{mouse}, x_{origin} + x_{mouse}). \quad (22)$$

After implementing the manipulator logic, we can move on to implementing animations. Each animation has the following attributes:

- Delay before the start and duration of the animation.
- The distance between the start and end coordinates of the figure to animate the movement of the figure along the x and y axes.
- The x and y scale factors for animating the shape’s resizing.
- Rotation.
- The skew: x та y .
- Opacity.

The panel for changing the animation attributes of the selected component will look like the one shown in Figure 6.

The *animejs* library is used to implement animations. The animation attributes are converted to a format that can be written to the *animejs* library to animate the elements. To do this, the initial and final values of the animation and the animated transformation are calculated.

In total, we have 8 types of animated transformations, including transparency. The following algorithm is used to calculate the start and end values of animations:

- The initial value is always equal to the current value of the corresponding shape attribute, except for scaling, since shapes don’t have their “own” scaling attribute. Therefore, the initial value in this case is always 1.
- The final value is always equal to the corresponding animation attribute, except for shift and rotates, because the values of these transformations are represented relative to the shape’s transformations. Therefore, the final value in this case is equal to the sum of the values of the corresponding shape and animation attribute.

Next, the list of animations is passed to the *animejs* library with the specified delay, duration, start and end values. For simplicity, the function from the animation time is linear for all animations.

The following algorithm, which uses the *animejs* library to calculate the numerical value of a particular animation at the current time, is as follows:

1. Call the *requestAnimationFrame(callback)* function [11] with the scheduled animation step if the time from the start of the animation does not exceed its duration. This function tells the browser that you want to perform an animation and you request that the browser call the specified function to update the animation right before the next redraw. The callback frequency is 60 times per second, which corresponds to the display refresh rate in most web browsers as recommended by the W3C technology standards [8].
2. Calculate the time from the beginning of the animation and its ratio to the total duration, i.e. the coefficient from 0 to 1.
3. Pass the coefficient to the easing function, which is specified by the user and returns a new coefficient in the same format. In our case, the coefficient will not be changed, since we are using a linear function.
4. Multiply the coefficient obtained in the previous step by the difference between the final and initial animation values and adds the result to the initial animation value.
5. Repeat step 1.

To visualize each figure, a separate local animation complex with common control is implemented. The results of transforming images of these types using the proposed approach are shown in Figure 7.

CLEAR

Position

X	701
Y	242

Size

W	100
H	100

Rotation

↻	0
---	---

Skew

X	0
Y	0

Opacity

👁	100%
---	------

Figure 5. Graphical representation of the attributes panel for shapes

Properties **Animations**

REMOVE

CLEAR

Timing, ms

Delay	0
Duration	1,000

Distance

X	0
Y	0

Scale

W	1
H	1

Rotation

↻	0
---	---

Skew

X	0
Y	0

Opacity

👁	100%
---	------

Figure 6. Graphical representation of the animation attributes panel

In addition, we also need to implement partial replacement of component attributes with new transformations at a certain point in the animation playback time to display them on the canvas and use them in the manipulator calculations. The end result is a convenient and attractive graphical web editor with the ability to transform and animate shapes, which has excellent performance.

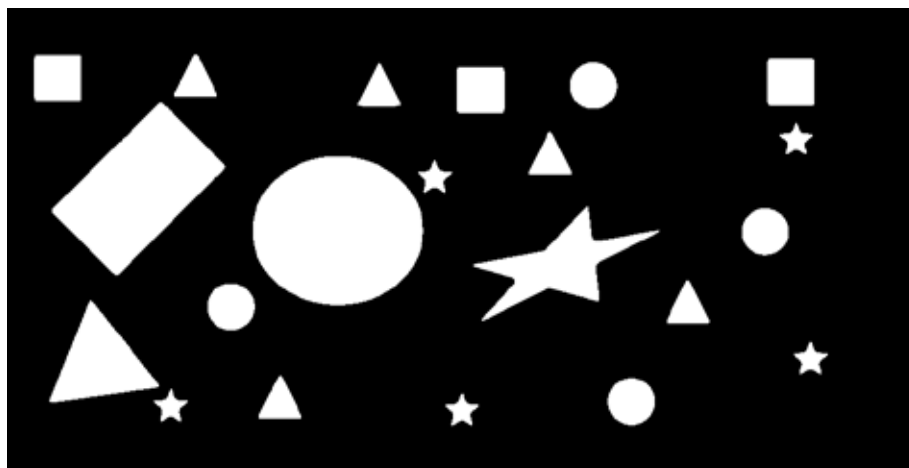


Figure 7. The result of image transformations implemented in software

Conclusions. Based on the analysis of the main existing algorithms and methods for implementing 2D transformations, a comprehensive algorithm for the optimized implementation of 2D transformations in graphic web editors based on affine transformations that provide the implementation of scaling, rotation, shift, and skew functions has been developed. The proposed algorithm incorporates the main advantages of implementing these functions and allows creating more efficient and high-quality graphic applications, while providing greater functionality and performance. The application of this approach creates new opportunities for the development and use of new types of web editors in the field of web design.

Bibliography:

1. Algorithm Archive – Affine Transformations. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.algorithm-archive.org/contents/affine_transformations/affine_transformations.html
2. W3Schools – CSS Transforms[Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.w3schools.com/css/css3_2dtransforms.asp.
3. MDN Web Docs – transform-origin [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/CSS/transform-origin>.
4. Tutorialspoint – Computer Graphics 2D Transformation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://www.tutorialspoint.com/computer_graphics/2d_transformation.htm.
5. Frederic Wang. Decomposition of 2D-transform matrices. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://frederic-wang.fr/decomposition-of-2d->
6. Wikipedia – Bresenham’s line algorithm. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Bresenham%27s_line_algorithm.transform-matrices.html
7. James D. Foley. Computer Graphics: Principles and Practice 2nd Edition / James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner, John F. Hughes // The System Programming Series, Addison-Wesley Publishing Company, 1996, 1250 p.
8. Addison-Wesley W3C Editor’s Draft – Chapter 8: Coordinate Systems, Transformations and Units. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.w3.org/TR/SVG/coords.html>.
9. Wikipedia – Bounding volume. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://en.wikipedia.org/wiki/Bounding_volume.
10. VueJS Framework Documentation. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://vuejs.org/>.
11. MDN Web Docs – Window: requestAnimationFrame() method. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/window/requestAnimationFrame>

References:

1. Algorithm Archive – Affine Transformations. URL: https://www.algorithm-archive.org/contents/affine_transformations/affine_transformations.html.
2. W3Schools – CSS Transforms URL: https://www.w3schools.com/css/css3_2dtransforms.asp.
3. MDN Web Docs – transform-origin. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/CSS/transform-origin>.
4. Tutorialspoint – Computer Graphics 2D Transformation. URL: https://www.tutorialspoint.com/computer_graphics/2d_transformation.htm
5. Frederic Wang – Decomposition of 2D-transform matrices. URL: <https://frederic-wang.fr/decomposition-of-2d-transform-matrices.html>.

-
6. Wikipedia – Bresenham’s line algorithm. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bresenham%27s_line_algorithm.
 7. Foley, J.D., van Dam A., Feiner S.K., Hughes J.F. (1996). Computer Graphics: Principles and Practice 2nd Edition / The System Programming Series, Addison-Wesley Publishing Company, 1250 p.
 8. Addison–Wesley W3C Editor’s Draft – Chapter 8: Coordinate Systems, Transformations and Units. URL: <https://www.w3.org/TR/SVG/coords.html>.
 9. Wikipedia – Bounding volume. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Bounding_volume.
 10. VueJS Framework Documentation. URL: <https://vuejs.org/>.
 11. MDN Web Docs – Window: requestAnimationFrame() method. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/API/window/requestAnimationFrame>

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

УДК 004.358

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.2>

Булгакова О. Ф., старший викладач кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-9834-2970

Ульяновська Ю. В., кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-5945-5251

Рябоволенко В. А., викладач кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-3049-2718

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ UNITY ДЛЯ ІНТЕГРАЦІЇ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ У 3D-МОДЕЛЮВАННІ ЛАНДШАФТІВ

У статті здійснено дослідження можливостей платформи Unity для інтеграції геопросторових даних у процесі 3D-моделювання ландшафтів. Об'єктом дослідження виступає процес створення реалістичних 3D-моделей ландшафтів із використанням відкритих джерел геопросторових даних, таких як OpenStreetMap та MapBox. У ході роботи було проаналізовано основні методи інтеграції геопросторових даних у середовище Unity, визначено переваги та недоліки різних підходів, а також розглянуто можливості операційних систем у підтримці цього процесу.

Результати дослідження показують, що Unity є потужним інструментом для 3D-візуалізації, який завдяки своїй гнучкості та можливостям підтримки різних форматів даних дозволяє створювати реалістичні та деталізовані моделі ландшафтів. Зокрема, проведені тести підтвердили, що використання методів рівнів деталізації (LOD), компресії текстур та оптимізації матеріалів дозволяє зберігати високу продуктивність Unity навіть на системах з обмеженими ресурсами. Водночас виявлено, що ефективність інтеграції та візуалізації залежить від операційної системи, на якій працює Unity, а також від правильного вибору методів обробки та оптимізації даних.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості застосування розроблених підходів для створення високоякісних візуалізацій у сфері архітектури, містобудування та геодезії. Окрім того, запропоновані методи можуть бути використані для розробки навчальних та інтерактивних додатків, що потребують інтеграції реальних геопросторових даних. Виявлені підходи до оптимізації процесів обробки та візуалізації даних можуть знайти застосування у розробці ігор та віртуальних середовищ, де вирішальне значення мають висока продуктивність і реалістичність моделювання. Отримані висновки також можуть слугувати основою для подальших досліджень, спрямованих на оптимізацію процесів інтеграції даних у 3D-моделюванні та розширенні функціональних можливостей Unity для роботи з різними джерелами геопросторових даних.

Ключові слова: 3D-моделювання, Unity, геопросторові дані, OpenStreetMap, MapBox, візуалізація ландшафтів, інтеграція даних, операційна система.

Bulhakova O. F., Ulianova Yu. V., Riabovolenko V. A. Exploring the potential of Unity for integrating geospatial data in 3D landscape modeling

This article explores the potential of the Unity platform for integrating geospatial data into the process of 3D landscape modeling. The study specifically focuses on the creation of realistic 3D landscape models using open-source geospatial data such as OpenStreetMap and MapBox. The research analyzes the main methods of integrating geospatial data into the Unity environment, identifies the advantages and disadvantages of different approaches, and examines the role of operating systems in supporting this process.

To achieve the objectives of the study, several key tasks were undertaken: the selection and preliminary processing of geospatial data from open sources, the adaptation of these data to Unity specifications through processes such as data conversion and the normalization of elevation values, and the integration of the data into Unity using specialized tools like Terrain Tools and Mapbox SDK. The study emphasizes the importance of optimizing these processes to ensure that Unity operates efficiently, even when handling large datasets.

Particular attention was given to the methods used for data processing and visualization to achieve high performance. Techniques such as Level of Detail (LOD) management, texture compression, and material optimization were employed, enabling Unity to maintain stable operation even on systems with limited resources. The research further explores how different operating systems can impact the performance and integration capabilities of Unity when managing large datasets. It was found that while Unity's flexibility and robust toolset allow for effective geospatial data integration, the efficiency of the overall modeling process is significantly influenced by the performance of the operating system and the optimization of Unity's settings for specific use cases. These findings highlight the necessity of carefully selecting both the software environment and the data processing methods to maximize the platform's capabilities.

The results demonstrate that Unity is a powerful tool for 3D visualization, providing flexibility and support for various data formats, enabling the creation of realistic and detailed landscape models. Beyond its application in traditional fields such as architecture, urban planning, and geodesy, the study reveals that the optimized models can also be effectively used in developing immersive virtual environments for educational and training purposes. Such environments can leverage real geospatial data to provide users with a more authentic experience, which is particularly valuable in fields like disaster management, military training, and environmental simulation. Additionally, the study suggests that the methods developed could be applied in the creation of interactive applications that require the integration of real-world geographic data.

The practical significance of the findings extends to various industries, including not only architecture, urban planning, and geodesy, but also the entertainment industry, particularly in game development and virtual reality applications where high performance and realism are critical. The study's conclusions provide a solid foundation for future research aimed at optimizing the processes of data integration and enhancing the functionality of Unity for handling a wider range of geospatial data sources. Future research could also explore the potential of integrating real-time data streams into Unity models, allowing for dynamic updates to landscapes based on current environmental conditions or other changing variables. This approach could significantly enhance the realism and practical applicability of 3D models in various real-world scenarios, making Unity an even more valuable tool across different sectors.

Key words: 3D modeling, Unity, geospatial data, OpenStreetMap, MapBox, landscape visualization, data integration, operating system.

Постановка проблеми. Тривимірне (3D) моделювання ландшафтів є важливим інструментом у таких галузях, як архітектура, містобудування, геодезія та розробка ігрових додатків. Високоякісні 3D-моделі дозволяють ефективно візуалізувати території та приймати обґрунтовані рішення щодо їх подальшого розвитку. Одним з ключових аспектів створення таких моделей є інтеграція геопросторових даних, зокрема карт, топографічних зображень та інформації про інфраструктуру.

Платформа Unity виділяється серед інструментів для 3D-моделювання завдяки своїй гнучкості та можливостям роботи з різними форматами даних. Проте процес інтеграції геопросторових даних у Unity має низку викликів. Зокрема, проблема полягає в забезпеченні сумісності форматів даних із вимогами Unity. Дані з таких джерел, як OpenStreetMap або MapBox, можуть мати різні формати, що потребує додаткових кроків для конвертації та адаптації.

Іншою важливою проблемою є забезпечення реалістичності моделювання. Незважаючи на потужні інструменти Unity, виникають труднощі з точним відтворенням деталей ландшафту, особливо для великих територій. Це загострюється через обмеженість апаратного забезпечення та ресурси операційної системи, що впливає на продуктивність моделювання.

Оптимізація робочих процесів в Unity для інтеграції геопросторових даних також є критичною. Використання стандартних методів обробки даних може призвести до надмірного навантаження на систему, що впливає на стабільність роботи. Застосування ж передових алгоритмів оптимізації дозволяє підвищити якість моделювання.

Роль операційної системи, яка підтримує роботу Unity, є ще одним важливим аспектом. Відповідність між можливостями операційної системи та вимогами Unity до апаратного забезпечення є критичним фактором для досягнення високої продуктивності.

Таким чином, дослідження можливостей Unity для інтеграції геопросторових даних у 3D-моделюванні ландшафтів є актуальним завданням, що потребує вирішення проблем сумісності, реалістичності та оптимізації робочих процесів для підвищення якості та продуктивності моделювання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останні роки ознаменувалися значним зростанням інтересу до використання 3D-технологій у різних галузях, зокрема в архітектурі, містобудуванні, геодезії та екологічному плануванні. Це зумовлено розвитком комп'ютерних технологій і збільшенням доступності відповідного програмного забезпечення. Одним із ключових напрямів досліджень є інтеграція геопросторових даних у 3D-середовища для створення реалістичних моделей, які можуть бути використані для планування, аналізу та візуалізації територій.

У цьому контексті варто відзначити дослідження Й. Сміта, присвячене інтеграції геопросторових даних з відкритих джерел, таких як OpenStreetMap, для створення тривимірних моделей. У своїй роботі автор аналізує переваги та недоліки цих даних, зокрема їх доступність, точність і можливість використання для конкретних завдань [1, с. 14]. Дослідження також підкреслює необхідність попередньої обробки даних перед їх інтеграцією у 3D-моделі.

Серед програмних засобів, що активно використовуються для інтеграції геопросторових даних, можна виділити ГІС-системи (Geographic Information System). Дослідження П. Іванова та К. Білого зосереджене на аналізі можливостей традиційних ГІС-програм, таких як ArcGIS та QGIS, для 3D-візуалізації. Автори вказують, що хоча ці програми мають потужні інструменти для обробки геопросторових даних, їх можливості щодо 3D-візуалізації залишаються обмеженими, що стимулює дослідників до пошуку нових рішень [2, с. 47].

Unity як платформа для 3D-моделювання привертає дедалі більше уваги серед дослідників завдяки своїй гнучкості та здатності підтримувати різні формати даних. У дослідженні Л. Грехема акцентується увага на використанні Unity для інтеграції геопросторових даних із таких джерел, як OpenStreetMap, і подальшої адаптації цих даних для роботи в Unity. Автор також аналізує виклики, пов'язані із сумісністю форматів даних, і пропонує методи для їх вирішення, зокрема використання спеціалізованих алгоритмів конвертації [3, с. 35].

Крім того, значна увага приділяється дослідженням продуктивності Unity при роботі з великими обсягами геопросторових даних. У роботі М. Петрова та О. Сидоренка зазначається, що ефективність роботи Unity значною мірою залежить від операційної системи та апаратного забезпечення, що використовуються для обробки даних. Автори проводять серію експериментів, порівнюючи продуктивність Unity на різних операційних системах, і роблять висновки про оптимальні налаштування платформи та операційної системи для підвищення продуктивності [4, с. 61].

Окремо варто відзначити роботи, присвячені проблемі реалістичності візуалізації ландшафтів у Unity. Дослідження С. Брауна показує, що хоча Unity має потужні інструменти для створення тривимірних моделей, проблема полягає в точному відтворенні деталей ландшафту, особливо при моделюванні великих територій. Автор пропонує використання алгоритмів оптимізації та спеціалізованих бібліотек, що дозволяють підвищити деталізацію моделей без значного збільшення навантаження на систему [5, с. 29].

Таким чином, аналіз останніх досліджень показує, що інтеграція геопросторових даних у Unity є актуальною темою, яка привертає увагу дослідників і розробників. Незважаючи на значні досягнення в цій галузі, залишаються відкритими питання, пов'язані з оптимізацією процесів інтеграції та візуалізації, підвищенням продуктивності роботи Unity, а також забезпеченням високої якості та реалістичності моделей. Це підкреслює необхідність подальших досліджень і розробки нових підходів, які дозволять ефективно використовувати Unity для створення 3D-моделей ландшафтів з використанням геопросторових даних.

Метою статті є дослідження можливостей використання платформи Unity для інтеграції геопросторових даних у 3D-моделюванні ландшафтів. Основна задача полягає в аналізі методів обробки та візуалізації геопросторових даних у Unity для створення реалістичних та деталізованих моделей ландшафтів, аналізі технічних аспектів, що впливають на якість і продуктивність моделювання, зокрема сумісність форматів даних і оптимізація роботи Unity. Для досягнення мети необхідно розв'язати такі задачі:

- здійснити вибір та підготовку геопросторових даних із відкритих джерел;
- адаптувати дані до специфікацій Unity та інтегрувати їх у середовище моделювання;
- оптимізувати процеси обробки та візуалізації моделей для забезпечення високої продуктивності.

Виклад основного матеріалу

Вибір та підготовка геопросторових даних. Першим етапом дослідження є ідентифікація та вибір відповідних джерел геопросторових даних, які використовуються для створення 3D-моделей ландшафтів у Unity. Основна увага приділялася відкритим джерелам даних, що забезпечують високу деталізацію та актуальність інформації. Серед таких джерел були обрані OpenStreetMap (OSM) та MapBox.

OpenStreetMap є одним із найбільших і найвідоміших джерел відкритих геопросторових даних, надаючи доступ до широкого спектра інформації про топографію, інфраструктуру, дорожню мережу, водні ресурси та інші елементи ландшафту [6]. Ці дані доступні у різних форматах, включаючи формат GeoJSON, який легко інтегрується в різні платформи, зокрема Unity [7]. Однак перед використанням ці дані потребують попередньої обробки для забезпечення їх сумісності з Unity.

MapBox також надає доступ до геопросторових даних, які можуть бути використані для створення тривимірних моделей. MapBox надає потужні інструменти для роботи з картографічною інформацією, включаючи можливості візуалізації даних та їх інтеграції в Unity через MapBox SDK [8]. Цей інструмент дозволяє завантажувати й обробляти картографічні дані безпосередньо в Unity, що значно спрощує процес створення моделей.

Після вибору джерел даних була проведена попередня обробка, яка включала конвертацію даних у формати, що підтримуються Unity. Наприклад, дані з OpenStreetMap були конвертовані у формат GeoJSON, що дозволило легко імпортувати їх у Unity з мінімальною втратою точності та деталізації [9]. Окрім того,

були застосовані алгоритми очищення даних, що допомогли усунути помилки та неточності в оригінальних даних.

Попередня обробка даних також включала адаптацію висотних моделей і рельєфу, які є ключовими компонентами для створення реалістичних ландшафтів. Висотні дані були інтегровані в Unity через інструменти Terrain Tools, що дозволило створити тривимірний рельєф з високою точністю [10]. Ці дані були попередньо нормалізовані та підготовлені для забезпечення їхнього належного відображення в 3D-середовищі Unity.

Таким чином, етап вибору та підготовки геопросторових даних забезпечив надійну основу для подальших етапів дослідження, зокрема для інтеграції цих даних у Unity та створення реалістичних 3D-моделей ландшафтів.

Адаптація даних та інтеграція в Unity. Після вибору та попередньої обробки геопросторових даних наступним етапом дослідження стало їх інтегрування в середовище Unity. Цей процес включав декілька важливих кроків, таких як адаптація даних до специфікацій Unity, використання спеціалізованих інструментів і плагінів, а також забезпечення належного відображення ландшафту з високою точністю.

Для інтеграції даних в Unity були використані спеціалізовані інструменти, зокрема Terrain Tools та Mapbox SDK для Unity. Terrain Tools є потужним інструментом, який дозволяє створювати та редагувати рельєфи безпосередньо в Unity. Використання цього інструменту забезпечує точне відтворення топографічних даних, дозволяючи створювати складні ландшафти з різними рівнями деталізації [10].

Mapbox SDK для Unity надає розробникам можливість інтегрувати дані з Mapbox безпосередньо у свої проекти. Цей SDK підтримує завантаження та відображення картографічних даних, таких як дорожні мережі, будівлі, водойми та інші елементи, у 3D-середовищі Unity [8]. Використовуючи цей інструмент, було можливо завантажувати та візуалізувати картографічні дані в реальному часі, що забезпечило високу точність і реалістичність моделей.

При інтеграції даних у Unity виникли певні виклики, пов'язані з необхідністю адаптації даних до специфікацій цієї платформи. Дані, отримані з OpenStreetMap та Mapbox, спочатку були підготовлені для використання в Unity шляхом конвертації у формати, що підтримуються платформою, такі як GeoJSON [7]. Крім того, необхідно було забезпечити відповідність координатної системи даних системі координат Unity, яка використовує систему координат на основі метричних одиниць.

Для досягнення реалістичності відображення ландшафтів були використані методи нормалізації висотних даних. Цей процес включав перетворення висотних значень в масштабі, що відповідає метриці Unity, для забезпечення коректного відтворення рельєфу. Особливу увагу було приділено деталізації ландшафтів, зокрема відображенню гірських масивів, річкових систем та інших складних елементів рельєфу [9].

Одним із ключових аспектів успішної інтеграції геопросторових даних в Unity є забезпечення точності відображення ландшафтів. Для цього були застосовані методи багаторівневої деталізації (LOD), що дозволяють зменшити навантаження на систему шляхом адаптації кількості полігонів залежно від відстані до об'єкта [11]. Використання LOD дозволило досягти балансу між продуктивністю та якістю відображення, що є критичним при створенні великих та складних моделей ландшафтів.

Таким чином, адаптація геопросторових даних та їх інтеграція в Unity вимагали комплексного підходу, включаючи використання спеціалізованих інструментів, адаптацію даних до специфікацій Unity та забезпечення високої точності та реалістичності відображення ландшафтів.

Оптимізація процесів обробки та візуалізації. На цьому етапі дослідження основна увага була приділена оптимізації процесів обробки та візуалізації геопросторових даних у Unity. Враховуючи, що робота з великими обсягами даних може значно впливати на продуктивність системи, були застосовані різні методи оптимізації, спрямовані на зменшення навантаження на апаратні ресурси та забезпечення плавності роботи Unity під час створення та відображення 3D-моделей ландшафтів.

Одним із ключових методів оптимізації, використаних у дослідженні, є застосування рівнів деталізації (LOD). LOD дозволяє динамічно змінювати кількість полігонів, що використовуються для відображення об'єкта, залежно від відстані до камери. Це значно знижує навантаження на графічний процесор, особливо під час роботи з великими ландшафтами, де важливо зберегти високу продуктивність без втрати якості відображення на близькій відстані [11].

У дослідженні були налаштовані кілька рівнів деталізації для кожного типу об'єктів, зокрема для елементів ландшафту, таких як гори, ліси та будівлі. Це дозволило зменшити кількість рендерингу на об'єктах, які знаходяться далеко від камери, і водночас зберегти високу якість зображення на об'єктах, які розташовані ближче.

Іншою важливою частиною оптимізації було зменшення навантаження на систему за рахунок оптимізації текстур і матеріалів. У цьому дослідженні було використано кілька методів компресії текстур, щоб зменшити їхній розмір без значної втрати якості. Це дозволило зменшити використання пам'яті і прискорити завантаження сцен у Unity.

Також була здійснена оптимізація матеріалів шляхом зменшення кількості шейдерів та використання стандартних матеріалів Unity, що зменшило кількість обчислень, які необхідно виконати графічному

процесору. Завдяки цьому вдалося досягти значного покращення продуктивності без суттєвих втрат у візуальній якості.

Досягнення оптимального балансу між продуктивністю та якістю відображення було одним із головних викликів цього дослідження. У ході оптимізації було проаналізовано кілька варіантів налаштувань Unity, зокрема параметри відтворення тіней, освітлення та відбиттів. Параметри були налаштовані таким чином, щоб забезпечити плавну роботу додатку навіть на системах з обмеженими ресурсами, зберігаючи при цьому прийнятну якість візуалізації.

Особливу увагу було приділено налаштуванню тіней, оскільки вони можуть значно впливати на продуктивність. Були випробувані різні типи тіней, такі як реалістичні тіні з високою роздільною здатністю для ближніх об'єктів і простіші, більш розмиті тіні для дальніх об'єктів. Це дозволило зменшити навантаження на систему і підтримувати стабільну частоту кадрів.

Фінальним етапом оптимізації було тестування продуктивності на різних апаратних платформах, включаючи як потужні робочі станції, так і менш продуктивні мобільні пристрої. Тести показали, що налаштування, здійснені під час оптимізації, забезпечують стабільну роботу Unity незалежно від платформи. На основі результатів тестування були внесені остаточні коригування до налаштувань, щоб забезпечити максимальну сумісність і продуктивність на різних пристроях.

Таким чином, проведені заходи з оптимізації дозволили значно підвищити ефективність роботи Unity при створенні та відображенні 3D-моделей ландшафтів, забезпечуючи плавну і стабільну роботу навіть у складних сценах з великими обсягами даних.

Тестування та оцінка якості моделей. Після завершення етапів підготовки, адаптації та оптимізації геопросторових даних у середовищі Unity, основна увага була зосереджена на тестуванні створених 3D-моделей ландшафтів. Метою цього етапу було оцінити точність відтворення геопросторових даних, реалістичність візуалізації, а також продуктивність роботи Unity при відображенні складних ландшафтів у реальному часі.

Одним із ключових аспектів тестування була перевірка точності відтворення геопросторових даних у Unity. Для цього використовувались оригінальні дані з OpenStreetMap та MapBox, які були порівняні з кінцевими 3D-моделями, створеними в Unity. Особлива увага приділялася перевірці відповідності координат, масштабу і пропорцій об'єктів у моделі реальним даним.

Для проведення цього тестування були використані вбудовані інструменти Unity, що дозволяють точно вимірювати відстані між об'єктами та оцінювати їх розміри. Порівняння показало, що відхилення між оригінальними даними і моделями в Unity є мінімальними, що підтверджує високу точність адаптації та інтеграції даних. Однак у деяких випадках були виявлені незначні відхилення, пов'язані з конвертацією координатних систем і нормалізацією висотних даних.

Наступним важливим етапом було оцінювання реалістичності створених моделей ландшафтів. Для цього були проведені візуальні тести, що включали порівняння зображень моделей з реальними фотографіями місцевостей, які вони відтворювали. Оцінювалися такі параметри, як деталізація рельєфу, текстури поверхонь, освітлення і тіні, а також загальна якість візуалізації.

Для покращення реалістичності були застосовані такі техніки, як динамічне освітлення, відображення відблисків і тіней, а також налаштування шейдерів для відтворення текстур поверхонь. Тести показали, що застосовані методи дозволили досягти високого рівня реалістичності, що робить моделі придатними для використання в додатках, де важлива візуальна точність, наприклад, в архітектурному проектуванні або віртуальних турах.

Окрім оцінки точності та реалістичності, важливим аспектом було тестування продуктивності Unity під час роботи з великими ландшафтними моделями. Було проведено серію тестів на різних апаратних платформах, включаючи як високопродуктивні робочі станції, так і мобільні пристрої з обмеженими ресурсами.

Тести включали вимірювання часу завантаження моделей, частоти кадрів (FPS) під час рендерингу, а також загального використання ресурсів системи, таких як пам'ять і процесор. Результати показали, що застосовані методи оптимізації, зокрема рівні деталізації (LOD) і оптимізація текстур, дозволили значно підвищити продуктивність, навіть на системах з обмеженими ресурсами.

Зокрема, на мобільних пристроях вдалося досягти стабільної частоти кадрів вище 30 FPS, що є прийнятним для більшості додатків, пов'язаних з візуалізацією ландшафтів. На потужних робочих станціях продуктивність була ще вищою, з частотою кадрів понад 60 FPS при рендерингу великих і складних сцен.

Загальна оцінка якості створених моделей включала зважування результатів усіх проведених тестів. Після завершення всіх етапів тестування можна зробити висновок, що розроблені 3D-моделі ландшафтів у Unity відповідають високим стандартам точності та реалістичності, а також демонструють високу продуктивність у різних умовах експлуатації.

Завдяки проведеним оптимізаціям і налаштуванням Unity, моделі можуть бути використані в різних галузях, таких як архітектура, містобудування, геодезія, а також в індустрії розваг і віртуальної реальності. Тестування також показало, що запропоновані підходи до інтеграції геопросторових даних можуть бути успішно застосовані для створення реалістичних і деталізованих моделей, які ефективно працюють навіть на платформах з обмеженими ресурсами.

Висновки. Результати дослідження продемонстрували, що платформа Unity є ефективним інструментом для інтеграції геопросторових даних у процесі 3D-моделювання ландшафтів. Використання відкритих джерел даних, таких як OpenStreetMap та MapBox, у поєднанні з належною підготовкою та адаптацією цих даних до специфікацій Unity, дозволило створити високоякісні та реалістичні моделі. Застосовані методи оптимізації, зокрема рівні деталізації (LOD) та оптимізація текстур, забезпечили високу продуктивність і стабільність роботи Unity навіть при роботі з великими обсягами даних і на різних апаратних платформах, включаючи мобільні пристрої. Тестування показало, що отримані 3D-моделі мають високу точність відтворення та реалістичність візуалізації, що робить їх придатними для використання в таких галузях, як архітектура, містобудування, геодезія та віртуальна реальність. Загалом, дослідження підтвердило перспективність Unity як універсальної платформи для створення інтерактивних і високоякісних моделей ландшафтів, що можуть ефективно застосовуватися в різних сферах.

Попри досягнуті результати, є кілька напрямків, які потребують подальших досліджень:

1. Хоча використані методи оптимізації показали свою ефективність, подальші дослідження можуть бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів обробки даних та оптимізацію рендерингу, особливо для великих ландшафтних моделей або моделей з високою деталізацією.

2. У майбутніх дослідженнях можна розглянути інтеграцію додаткових джерел геопросторових даних, таких як супутникові знімки або дані з безпілотних літальних апаратів (БПЛА), що дозволить ще більше підвищити точність і реалістичність моделей.

3. Перспективним напрямком є дослідження можливостей інтерактивності створених моделей, зокрема додавання сценаріїв поведінки, симуляції природних процесів, таких як зміни клімату або рух води, що може бути корисним для екологічного планування та досліджень.

4. Подальші дослідження можуть зосередитися на адаптації розроблених моделей для специфічних галузей, таких як військове планування, розробка ігор або освіта, що вимагатиме розробки нових підходів до інтеграції та оптимізації геопросторових даних.

Отже, отримані результати є важливим кроком у розвитку методології інтеграції геопросторових даних у 3D-моделювання на платформі Unity. Подальші дослідження у цьому напрямку дозволять розширити можливості платформи та забезпечити її ефективне застосування у ще більш широкому спектрі галузей.

Список використаних джерел:

1. Сміт Й. Інтеграція геопросторових даних з відкритих джерел для створення 3D-моделей. Журнал геоінформаційних систем. 2020. № 3. С. 12-19.

2. Іванов П., Білий К. Можливості використання ГІС для 3D-візуалізації ландшафті. Геодезичний вісник. 2019. № 5. С. 45-52.

3. Грехем Л. Використання Unity для інтеграції геопросторових даних у 3D-моделюванні ландшафтів. Журнал комп'ютерних наук. 2021. № 7. С. 34-41.

4. Петров М., Сидоренко О. Продуктивність Unity при роботі з великими обсягами геопросторових даних. Комп'ютерні технології та системи. 2020. № 6. С. 58-65.

5. Браун С. Оптимізація візуалізації ландшафтів у Unity: нові підходи. Журнал цифрових технологій. 2021. № 8. С. 27-33.

6. OpenStreetMap. Available at: <https://www.openstreetmap.org/>

7. GeoJSON Format Specification. Available at: <https://geojson.org/>

8. Mapbox SDK for Unity. Available at: <https://www.mapbox.com/unity-sdk/>

9. Documentation for Converting Data into GeoJSON. Available at: <https://docs.openstreetmap.org/help/how-to/convert-into-geojson>

10. Unity Terrain Tools Documentation. Available at: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.terrain-tools@4.0/manual/index.html>

11. Unity LOD (Level of Detail) Documentation. Available at: <https://docs.unity3d.com/Manual/class-LODGroup.html>

References:

1. Smith, J. Integration of Geospatial Data from Open Sources for Creating 3D Models. Journal of Geoinformation Systems, 2020, No. 3, pp. 12-19.

2. Ivanov, P., & Bilyi, K. Possibilities of Using GIS for 3D Visualization of Landscapes. Geodetic Bulletin, 2019, No. 5, pp. 45-52.

3. Graham, L. Using Unity for Integrating Geospatial Data in 3D Landscape Modeling. Journal of Computer Science, 2021, No. 7, pp. 34-41.

4. Petrov, M., & Sydorenko, O. Performance of Unity in Handling Large Volumes of Geospatial Data. Computer Technologies and Systems, 2020, No. 6, pp. 58-65.

5. Brown, S. Optimization of Landscape Visualization in Unity: New Approaches. Journal of Digital Technologies, 2021, No. 8, pp. 27-33.

-
6. OpenStreetMap. Available at: <https://www.openstreetmap.org/>
 7. GeoJSON Format Specification. Available at: <https://geojson.org/>
 8. Mapbox SDK for Unity. Available at: <https://www.mapbox.com/unity-sdk/>
 9. Documentation for Converting Data into GeoJSON. Available at: <https://docs.openstreetmap.org/help/how-to/convert-into-geojson>
 10. Unity Terrain Tools Documentation. Available at: <https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.terrain-tools@4.0/manual/index.html>
 11. Unity LOD (Level of Detail) Documentation. Available at: <https://docs.unity3d.com/Manual/class-LODGroup.html>

Зінченко А. Ю., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри математичних методів системного аналізу
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0003-1586-3645

Хайдуров В. В., кандидат технічних наук, старший дослідник,
доцент кафедри математичного моделювання та аналізу даних
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-4805-8880

ПОКРАЩЕННЯ РОЗПІЗНАВАННЯ СТРУКТУРОВАНОГО ТЕКСТУ НЕЙРОННОЮ МЕРЕЖЕЮ YOLO

У даній роботі розглядається підхід до покращення розпізнавання структурованого тексту за допомогою інтеграції нейронної мережі YOLO (You Only Look Once) та технології OCR (Optical Character Recognition). Метою роботи є дослідження можливостей підвищення ефективності розпізнавання структурованого тексту шляхом інтеграції моделі YOLO з технологією OCR, а також створення автоматизованої інформаційної системи для виявлення текстових об'єктів та їх подальшого розпізнавання, що дозволяє підвищити ефективність обробки структурованого тексту.

Авторами запропоновано архітектуру багатопотокової моделі, що використовує рекурентні та дво- та тривимірні згорткові нейронні мережі. Розроблене програмне забезпечення, що реалізує алгоритми обчислення оптичного потоку та частотного аналізу символів, написано на мові Python із використанням бібліотек Ultralytics, Pytesseract, Python Image Library та фреймворку веб-додатків Flask. Інтерфейс реалізовано за допомогою HTML, CSS та JavaScript, а для зберігання даних обрано базу даних MySQL. Головною особливістю системи є інтеграція моделі YOLO та OCR для забезпечення точного та швидкого розпізнавання текстових об'єктів на зображеннях.

Розроблена автоматизована інформаційна система є сервіс-орієнтованою, що дозволяє користувачам завантажувати інвойси, зберігати їхні дані та отримувати аналітику щодо витрат і взаємодії з клієнтами. Система включає нейронну мережу YOLOv10, натреновану на 500 зображеннях інвойсів, REST API для користувацької взаємодії, інтерфейс для завантаження інвойсів, а також об'єкти бази даних MySQL для зберігання інформації про користувачів та їхні інвойси.

Архітектура побудована за шаблоном MVC (Model-View-Controller): модель обробляє дані та бізнес-логіку, контролер зв'язує модель і представлення, а саме представлення демонструє дані користувачам. Така структура забезпечує чітке розмежування функцій між компонентами. Додатково система містить сервісні шари для бізнес-логіки та маршрутизації, а також використовує інструмент Blueprint фреймворку Flask для поділу додатка на менші компоненти та організації URL-адрес.

Аналіз результатів розпізнавання тексту показав високу точність OCR, зокрема для структурованого тексту, хоча зустрічаються недоліки, такі як порушення початкової структури тексту. Однак ці недоліки можуть бути мінімізовані шляхом використання мережі YOLO разом з технологією OCR.

Ключові слова: YOLO, OCR, розпізнавання тексту, нейронні мережі, обробка зображень.

Zinchenko A. Yu., Khaidurov V. V. Improving structured text recognition with YOLO neural network

This paper explores improving structured text recognition by integrating the YOLO (You Only Look Once) neural network and OCR (Optical Character Recognition) technology. This work aims to explore ways to enhance the efficiency of structured text recognition through the integration of the YOLO model with OCR technology, as well as to develop an automated information system for detecting and subsequently recognizing text objects, which improves the overall efficiency of structured text processing.

The developed system is a web application that enables users to upload invoices, store their data, and receive insights into expenses and client interactions. It includes a YOLOv10 neural network trained on a dataset of 500 invoice images, a REST API for user interaction, a user interface for invoice uploading, and a MySQL database to store information about users and their invoices.

The authors propose a multithreaded architecture model that utilizes recurrent and two- and three-dimensional convolutional neural networks. The software, which implements algorithms for optical flow calculation and frequency analysis of characters, is developed in Python using Ultralytics, Pytesseract, Python Image Library, and Flask libraries. HTML, CSS, and

JavaScript are used for the user interface, and MySQL is the chosen database model. The system's main feature is the integration of the YOLO and OCR models to ensure accurate and fast recognition of text objects in images.

The system architecture follows the MVC (Model-View-Controller) pattern, where the model handles data and logic, the controller acts as an intermediary between the view and model, and the view displays data to users. Each component has its respective roles and functions, making the system well-structured and easy to modify.

Additional service layers are used for business logic and routing, and Flask's Blueprint tool organizes the application into smaller components and URL structures. Overall, the system is well-structured, ensuring efficient data handling and a user-friendly interface for seamless interaction.

The analysis of text recognition results demonstrated high OCR accuracy, particularly with structured text, though some limitations were observed, such as disruptions in the original text structure. These drawbacks can be mitigated by combining the YOLO network with OCR technology.

Integrating YOLO with OCR enhances the system's text recognition efficiency, enabling more precise detection of text objects and their subsequent recognition. Despite these achievements, there is room for further improvement, specifically in refining object detection and text recognition algorithms to achieve even greater accuracy and processing speed.

Key words: YOLO, OCR, text recognition, neural networks, image processing.

Постановка проблеми. Автоматичне виявлення та розпізнавання тексту на зображеннях і відео є однією з найважливіших задач у галузі комп'ютерного зору та обробки зображень. Незважаючи на значний прогрес у цій сфері, ідентифікація структурованого тексту залишається складним завданням. Це пов'язано з різноманіттям шрифтів, розмірів та орієнтацій текстових елементів, а також із зовнішніми факторами, такими як умови освітлення та низька якість зображень. Ці обставини ускладнюють точне розпізнавання текстових об'єктів, що в свою чергу впливає на ефективність автоматизації в таких секторах, як фінанси, медицина, логістика, транспорт та інші.

Структурований текст зустрічається в багатьох сферах: у документах, табличних даних, на номерних знаках, плакатах тощо. З огляду на це, точне і швидке розпізнавання таких текстових об'єктів є критично важливим для автоматизації процесів обробки інформації. Використання технології OCR (Optical Character Recognition) стало стандартом для розпізнавання тексту на зображеннях, проте її традиційні методи є недостатньо ефективними у випадках, коли текст має складну структуру або розміщений на низькоякісних зображеннях.

Щоб подолати ці труднощі, в даній роботі пропонується новий підхід – інтеграцію нейронної мережі YOLO, яку використано для виявлення текстових об'єктів, з технології OCR для подальшого їх розпізнавання. Нейронна мережа YOLO відзначається високою швидкістю роботи і точністю виявлення об'єктів, що робить її перспективною для застосування у розпізнаванні тексту, особливо структурованого. Поєднання можливостей YOLO з OCR дозволяє суттєво підвищити ефективність обробки текстових даних, розширюючи функціональність таких систем для обробки великого обсягу інформації у вигляді текстових зображень, зокрема інвойсів, рахунків та інших документів.

Таким чином, розроблення інтегрованої моделі, яка об'єднує YOLO та OCR, спрямована на подолання недоліків традиційних методів та створення автоматизованої інформаційної системи для високоточного і швидкого розпізнавання тексту на зображеннях. Важливість цього підходу зростає в умовах цифрової трансформації, коли швидкість та якість обробки даних є критичними для багатьох сфер, таких як фінанси, охорона здоров'я та транспорт. Саме тому розроблення та застосування ефективних методів та алгоритмів, які б забезпечували точне та швидке розпізнавання структурованого тексту на зображеннях, а також створення автоматизованої інформаційної системи (AIC) для виявлення текстових об'єктів та їх подальше розпізнавання, є темою актуальною та перспективною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень показав, що в останні роки значна увага приділяється вдосконаленню методів обробки зображень для розпізнавання та класифікації об'єктів. Хоча основи оптичного розпізнавання символів (OCR) були закладені десятиліття тому, проте і донині дана технологія є однією з ключових для перетворення тексту з зображень у цифровий формат. Так, в роботі Supriyanto та ін. [1] розглядається використання мультискейлового підходу Retinex для аналізу розпізнавання облич, що показує перспективу підходу до поліпшення якості обробки зображень з неоднорідним освітленням. Інші дослідження, зокрема Patel та ін. [2], зосереджуються на розпізнаванні патологій за допомогою обробки зображень, зокрема раку легень на комп'ютерних томографіях, використовуючи різні методи обробки зображень для покращення точності діагностики. У контексті загальних задач комп'ютерного зору цікаві результати представлені в роботі Vardhan та ін. [3] щодо застосування методів обробки зображень для розпізнавання емоцій.

У статті [4] розглядається еволюція алгоритмів YOLO для розпізнавання об'єктів, починаючи з першої версії і до YOLOv8. Автори аналізують покращення, які з'явилися на кожному етапі розвитку моделі, та нові технічні особливості YOLOv8. В статті запропоновані модифікації моделі, що вплинули на точність і продуктивність мережі в реальних умовах. Зокрема, зроблено акцент на вдосконаленнях архітектури. В роботі [5] запропоновано поліпшений алгоритм виявлення об'єктів на дорогах за допомогою інфрачервоного зображення, який базується на механізмі уваги (attention mechanism), що інтегрований у YOLOv8.

Дослідники адаптували YOLOv8 для роботи з інфрачервоними зображеннями, що забезпечує ефективніше розпізнавання об'єктів у складних умовах, таких як нічна зйомка або низька видимість. Це дозволило фокусуватися на найважливіших частинах зображення, що дозволяє досягати високої точності та стабільності алгоритму навіть у складних дорожніх умовах [5].

Основні принципи розроблення та проектування автоматизованих інформаційних систем, зокрема для багатовимірної обробки зображень, описані в роботах [6,7].

Мета статті: дослідження можливостей підвищення ефективності розпізнавання структурованого тексту шляхом інтеграції моделі YOLO з технологією OCR, а також створення автоматизованої інформаційної системи для виявлення текстових об'єктів та їх подальшого розпізнавання, що дозволяє підвищити ефективність обробки структурованого тексту.

Виклад основного матеріалу. Особливості застосування моделі YOLO для інтелектуального аналізу структурованого тексту. YOLO або «You Only Look Once» – це алгоритм виявлення об'єктів, що значно покращив можливості комп'ютерного зору в реальному часі, дозволяючи швидко і точно визначати об'єкти на зображеннях і відео. На відміну від традиційних алгоритмів виявлення об'єктів, які працюють у кілька етапів і потребують значних обчислювальних ресурсів, YOLO вирішує задачу виявлення об'єктів як проблему регресії, обчислюючи ймовірності класу і координати обмежувальних рамок у один прохід, безпосередньо з необроблених пікселів зображення. Для визначення координат обмежувальних рамок YOLO ділить вхідне зображення на сітку, де кожна комірка відповідає за об'єкти, що знаходяться в межах цієї комірки, з розрахунком їх класових ймовірностей. Такий підхід дозволяє YOLO виявляти кілька об'єктів різних класів за один прохід, забезпечуючи обробку в реальному часі, що робить його ідеальним для таких застосувань, як автономне водіння, відеоспостереження та робототехніка.

Структурований текст – це тип тексту, який має чітко визначену, логічно організовану структуру, як правило, у вигляді таблиць, списків або впорядкованих полів. Прикладами структурованого тексту є таблиці даних, інвойси, формуляри або будь-яка текстова інформація, що містить чіткі блоки, що легко виділяються та розпізнаються за певними правилами. Обробка структурованого тексту є важливою для автоматизації документів, оскільки така структура дозволяє легко витягувати й аналізувати конкретні дані з документів.

Основою багатьох сучасних алгоритмів глибокого навчання, включаючи модель YOLO, є згорткові нейронні мережі (CNN). CNN завдяки своїй здатності виявляти та ідентифікувати візуальні ознаки, дозволяють YOLO розпізнавати об'єкти у реальному часі. Ця можливість критично важлива для обробки структурованого тексту, де потрібно визначити, локалізувати та інтерпретувати текстові області в складних умовах.

Основна особливість CNN полягає у використанні локальних рецептивних полів, завдяки яким кожен нейрон обробляє тільки частину зображення, що дає змогу зменшити кількість обчислень. В YOLO цей підхід реалізується через поділ зображення на сітку, де кожна комірка відповідає за виявлення об'єктів, включаючи текстові блоки, в межах своїх областей. На перших етапах CNN знаходить прості елементи, такі як контури, тоді як на наступних шарах виділяються складніші структури, що дозволяє YOLO ідентифікувати текстові області різних форматів, шрифтів та розмірів.

Застосування CNN у YOLO також передбачає використання згорткових, об'єднувальних та повноз'єднаних шарів. Згортковий шар виділяє ознаки, які є важливими для аналізу тексту, а об'єднувальні шари зменшують просторовий розмір даних, що запобігає перенаванчання моделі та зменшує обсяг обчислень. Завдяки повноз'єднаним шарам, які інтегрують виявлені ознаки, YOLO може точно класифікувати знайдені області як текстові, а OCR може виконувати подальше детальне розпізнавання символів у цих областях.

Однією з основних метрик для оцінки точності моделей виявлення об'єктів є коефіцієнт перетину та об'єднання (IoU), який показує, наскільки точно обмежувальні рамки, передбачені моделлю, відповідають реальним об'єктам на зображенні. Для оцінки продуктивності моделей також використовується середня точність (AP), що визначається за допомогою кривої точності та відкликання. Відмінність YOLO від інших алгоритмів виявлення об'єктів полягає у використанні однієї повноз'єднаної нейронної мережі для прогнозування об'єктів на зображенні, що спрощує процес і підвищує продуктивність. Важливим компонентом YOLO є метод неакумулятивного стиснення (NMS), який підвищує точність і ефективність, видаляючи зайві обмежувальні рамки.

Оптичне розпізнавання тексту. Оптичне розпізнавання тексту (OCR) – це процес механічного або електронного перетворення зображень рукописного, друкованого або машинописного тексту в послідовність кодів, які використовуються для відображення в текстовому редакторі. Ця технологія широко застосовується для перетворення книг і документів в електронний формат, автоматизації облікових систем у бізнесі та публікації текстів на вебсайтах. OCR дозволяє редагувати текст, виконувати пошук слів чи фраз, зберігати інформацію в компактнішому вигляді, аналізувати дані, а також здійснювати електронний переклад, форматування чи перетворення тексту в мовлення.

Розглянемо, як працює OCR на конкретному прикладі. Для цього використаємо рушій tesseract-ocr і подамо на вхід файл зі структурованим текстом (рис. 1), у нашому випадку – інвойс. Для взаємодії з рушієм створимо простий скрипт на Python, скориставшись бібліотекою Pytesseract, яка забезпечує інтерфейс для роботи з рушієм.

Invoice no: 12060439

Date of issue:

08/29/2020

Seller:

Brown-Johnson
310 Amanda Corner Suite 472
North William, MN 33119

Tax Id: 981-94-7235
IBAN: GB78IXYE58273701690538

Client:

Calderon-Duran
9884 Roberts Tunnel
North Lindaside, VA 02674

Tax Id: 996-81-8911

ITEMS

No.	Description	Qty	UM	Net price	Net worth	VAT [%]	Gross worth
1.	Rectangle Area Rug Wood Grain Carpet Mat for Living Room Bedroom - 180x60cm	4,00	each	32,81	131,24	10%	144,36
2.	Rug for living room-Minion And Banana Area Rugs Living Room Carpet, Christmas...	2,00	each	29,96	59,92	10%	65,91
3.	Yilong 5'x7.5' Hand Knotted Silk Area Rug Medium Size Classic Floor Carpets 0186	3,00	each	2 800,00	8 400,00	10%	9 240,00

SUMMARY

	VAT [%]	Net worth	VAT	Gross worth
	10%	8 591,16	859,12	9 450,28
Total		\$ 8 591,16	\$ 859,12	\$ 9 450,28

Рис. 1. Інвойс сканований за допомогою OCR

Виконаємо наступний скрипт:

- import pytesseract
- from PIL import Image
- print(pytesseract.image_to_string(Image.open("invoice_0_charspace_1.png")))

Результатом виконання буде набір рядків тексту зчитаних із зображення:

Date of issue: 08/29/2020

Seller: Client:

Brown-Johnson Calderon-Duran
310 Amanda Corner Suite 472 9884 Roberts Tunnel
Morth Willlarm, MN 33119 Maorth Lindaside, WA 028674
Tax Id: 981-94-7235 Tax Id: 986-81-8911
IBAN: GB78IXYE58273701690538

ITEMS

No. Description Qty UM Net price Net worth VAT [%] Gross worth
1. Rectangle Area Rug Wood Grain 4,00 each 32,81 131,24 10% 144,36
Carpet Mat for Living Room
Bedroom – 180x60cm
2. Rug for living room-Minion And 2,00 each 29,96 59,92 10% 65,91
Banana Area Rugs Living Room
Carpet, Christmas...
3. Yilong 5'x7.5' Hand Knotted Silk 3,00 each 2 800,00 8 400,00 10% 9 240,00
Area Rug Medium Size Classic
Floor Carpets 0186

SUMMARY

VAT [%] Net worth VAT Gross worth
10% 8591,16 859,12 9 450,28
Total \$ 8 591,16 \$ 859,12 \$ 9 450,28

Недоліком цього підходу є втрата початкової структури тексту, що може ускладнити подальшу обробку даних, наприклад, конвертацію у формат JSON. Оскільки програма, використовуючи лише OCR, не здатна класифікувати кожне слово за його значенням, знадобилося б розробити алгоритм, який вручну розділяє та сортує всі слова і рядки для відновлення оригінальної структури й коректної обробки, що може бути складним завданням.

Хоча OCR є ефективним інструментом для перетворення тексту в цифровий формат, його використання має свої обмеження та потребує додаткової обробки для відновлення початкової структури тексту й досягнення більшої точності у складних випадках. Як показало проведене дослідження, оптимальним рішенням могла б стати інтеграція методів оптичного розпізнавання символів із додатковими технологіями, наприклад, згортковими нейронними мережами.

Запропонована архітектура та результати тестування. Авторами запропонована архітектура багатопотокової моделі для розпізнавання структурованого тексту (рис. 2), яка використовує рекурентні, а також дво- та тривимірні згорткові нейронні мережі. Розроблене програмне забезпечення створено на мові програмування Python з використанням бібліотек Ultralytics, pytesseract, Python Image Library та Flask. Основною характеристикою цієї архітектури є застосування алгоритмів обчислення оптичного потоку та частотного аналізу для розпізнавання символів, завдяки інтеграції технології OCR у систему.

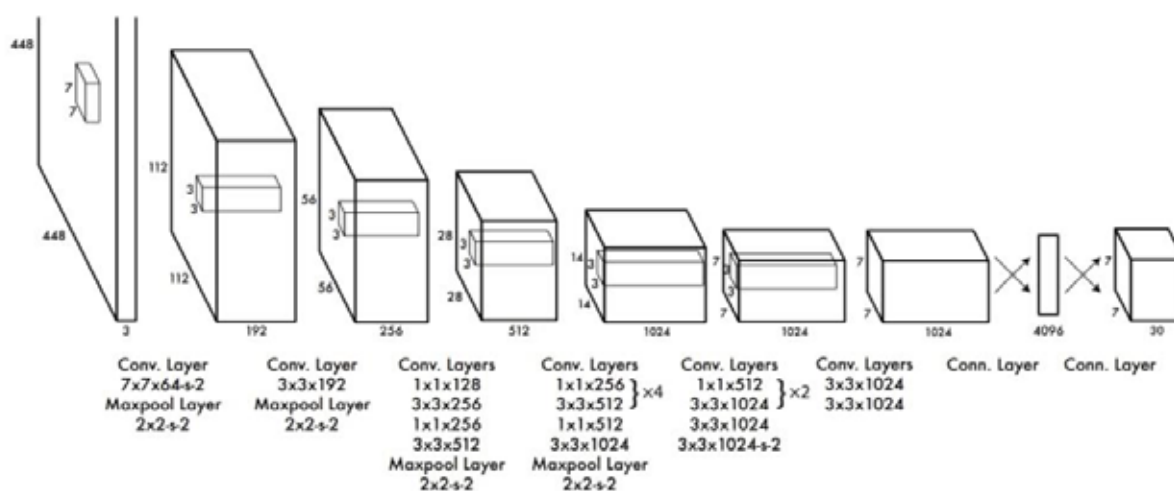


Рис. 2. Архітектура багатопотокової моделі розпізнавання структурованого тексту

Перші 20 згорткових шарів моделі пройшли попереднє навчання з використанням бази даних ImageNet, при цьому були підключені тимчасові шари Average Pooling та повнозв'язні шари Fully Connected. Після цього попередньо навчена модель адаптується для виконання завдання розпізнавання. Результати попередніх досліджень показали, що додавання згорткових і повнозв'язних шарів до попередньо навченої мережі підвищує її продуктивність. Останній повнозв'язний шар YOLO прогнозує як ймовірності класу, так і координати обмежувальної рамки.

Одним із ключових методів, які використовуються в моделях YOLO, є немаксимальне стиснення (NMS). NMS – це етап постобробки, що забезпечує підвищення точності та ефективності виявлення об'єктів. Під час виявлення об'єктів для одного об'єкта на зображенні зазвичай генерується кілька обмежувальних рамок. Ці рамки можуть перекриватися або розташовуватися в різних позиціях, але всі вони представляють один і той же об'єкт. NMS допомагає ідентифікувати та усунути зайві або неправильно побудовані обмежувальні рамки, виводячи єдину обмежувальну рамку для кожного об'єкта на зображенні.

Для подальшого використання та інтеграції в розроблену систему модель YOLOv10 була навчена на вибірці з 200 зображень інвойсів. Після 1500 ітерацій навчання було досягнуто 99% точності в розпізнаванні текстових даних на інвойсах. Серед можливих дефектів було виявлено некоректне накладання міток «generalText» на інші мітки. Для навчання нейромережі використовувалася мова програмування Python та бібліотека ultralytics, яка забезпечує доступ до різних типів моделей YOLO і дозволяє тренувати їх на власних даних. Алгоритм YOLO приймає зображення як вхідні дані, а потім використовує просту глибоку згорткову нейронну мережу для виявлення об'єктів на зображенні.

Ultralytics – це універсальна платформа для навчання моделей з виявлення об'єктів, сегментації екземплярів та класифікації зображень.

Виконаємо наступний скрипт:

1. from ultralytics import YOLO
2. model = YOLO('yolov10x.yaml')

3. results = model.train(data='config.yaml', epochs=5000, patience=0)
4. metrics = model.val()
5. model.predict('OCRdata/images/test', show=True, save=True)
6. model.export()

Процес і результати навчання представлені на рисунках 3 і 4.

Для оптичного розпізнавання тексту в розробленій архітектурі нейронної мережі був використаний рушій tesseract-ocr – Tesseract Open Source OCR Engine. Для інтеграції tesseract-ocr в інформаційну систему використовувалася бібліотека Python Pytesseract.

Epoch	GPU_mem	box_loss	cls_loss	dfl_loss	Instances	Size
1609/5400	14.5G	0.4724	0.2737	0.7985	1679	640: 100% ██████████ 11/11 [00:12<00:00, 1.14s/it]
	Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50 mAP50-95): 100% ██████████ 1/1 [00:00<00:00, 4.14it/s]
	all	10	286	0.46	0.458	0.44 0.255
1610/5400	15G	0.4501	0.2679	0.802	1689	640: 100% ██████████ 11/11 [00:12<00:00, 1.14s/it]
	Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50 mAP50-95): 100% ██████████ 1/1 [00:00<00:00, 4.48it/s]
	all	10	286	0.445	0.467	0.431 0.251
1611/5400	14.1G	0.4494	0.2666	0.8081	1359	640: 100% ██████████ 11/11 [00:12<00:00, 1.13s/it]
	Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50 mAP50-95): 100% ██████████ 1/1 [00:00<00:00, 4.13it/s]
	all	10	286	0.523	0.449	0.459 0.274
1612/5400	15G	0.4482	0.2666	0.8085	913	640: 100% ██████████ 11/11 [00:12<00:00, 1.13s/it]
	Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50 mAP50-95): 100% ██████████ 1/1 [00:00<00:00, 4.46it/s]
	all	10	286	0.475	0.489	0.45 0.258
1613/5400	14.3G	0.4557	0.2688	0.8017	1776	640: 100% ██████████ 11/11 [00:12<00:00, 1.14s/it]
	Class	Images	Instances	Box(P	R	mAP50 mAP50-95): 100% ██████████ 1/1 [00:00<00:00, 4.41it/s]
	all	10	286	0.475	0.489	0.45 0.258

Рис. 3. Процес тренування моделі YOLO

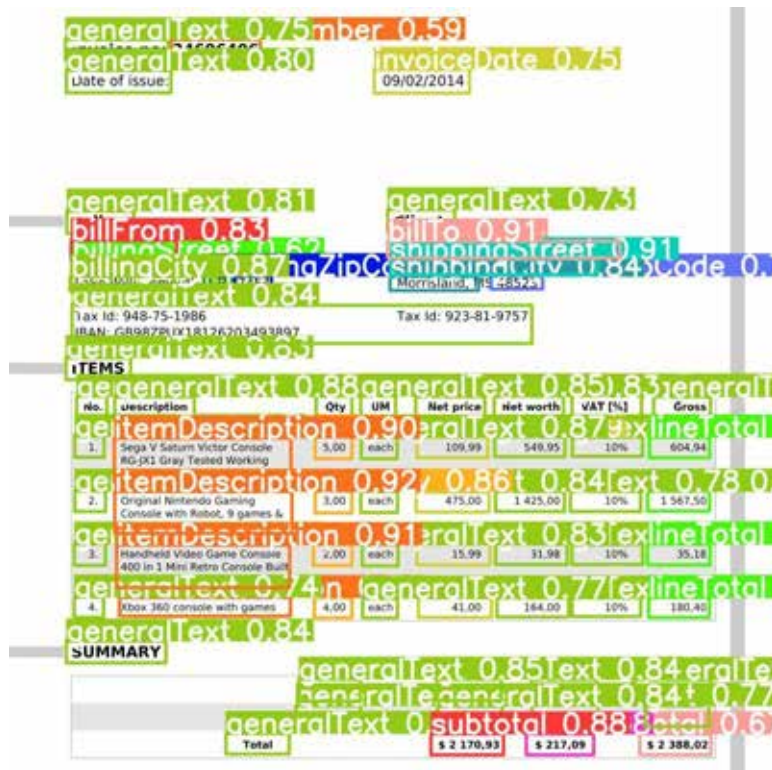


Рис. 4. Результат тренування YOLO.

Розроблення автоматизованої інформаційної системи розпізнавання структурованого тексту. Розроблена система проектувалася по сервіс-орієнтованій архітектурі (реалізація патерну MVC) і представляє собою веб-додаток, який дозволяє користувачам завантажувати інвойси, зберігати дані про них у своєму обліковому записі та переглядати аналітику витрат і взаємодії з клієнтами. Додаток включає такі компоненти:

1. Нейронну мережу YOLOv10, навчена на вибірці з 500 зображень інвойсів.
2. REST API, що забезпечує взаємодію користувача із системою.
3. Інтерфейс користувача для завантаження інвойсів та перегляду необхідної інформації про них.
4. Базу даних MySQL для збереження даних про зареєстрованих користувачів і завантажені ними інвойси.

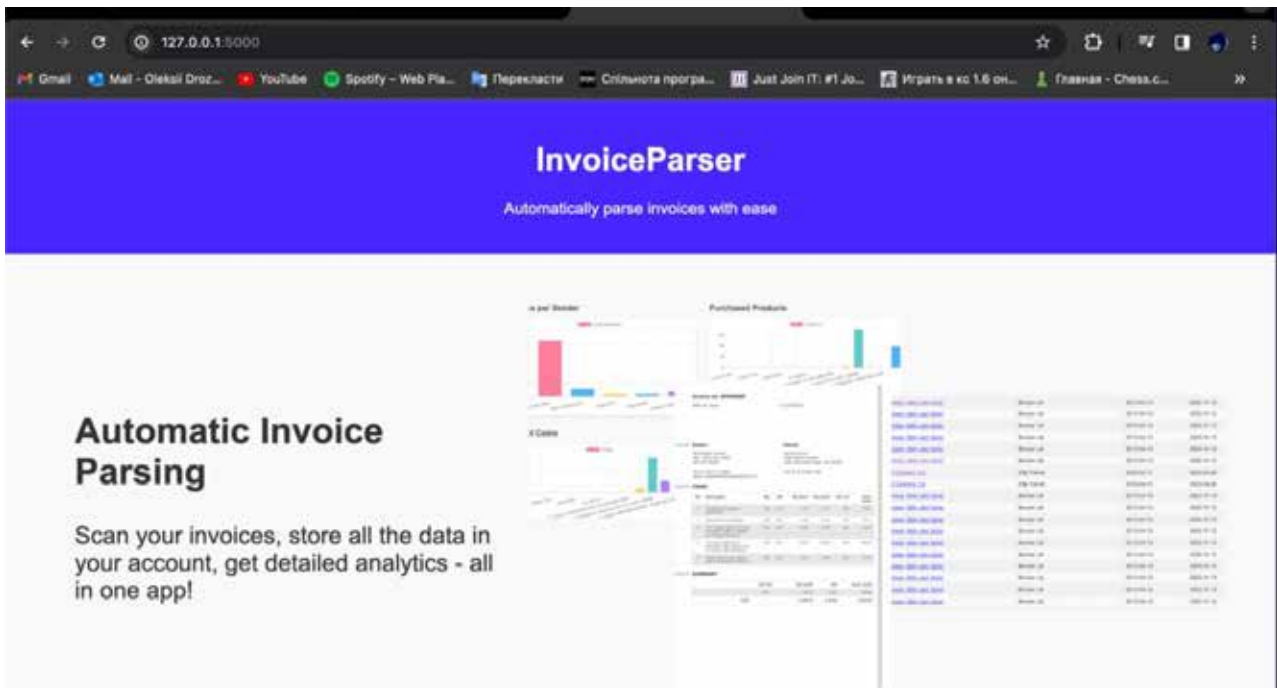


Рис. 5. Головна сторінка додатку

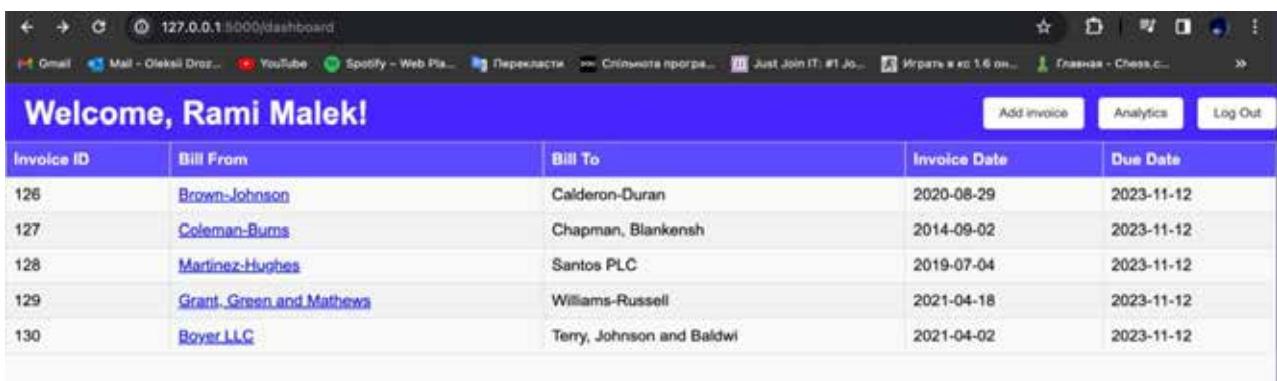


Рис. 6. Особистий кабінет користувача з усіма інвойсами

Серверний код, який відповідає за завантаження інвойсів, аналітику, роботу нейронної мережі та обробку її результатів, написаний на Python з використанням об'єктно-орієнтованого підходу, бібліотеки Flask для розробки API та Ultralytics для навчання й використання моделі YOLOv10. Інтерфейс користувача реалізований на HTML, CSS та JavaScript.

На рис. 5–7 представлені головний інтерфейс програми, особистий кабінет та можливості аналітики – звітність розпізнавання структурованого тексту нейронною мережею YOLO.

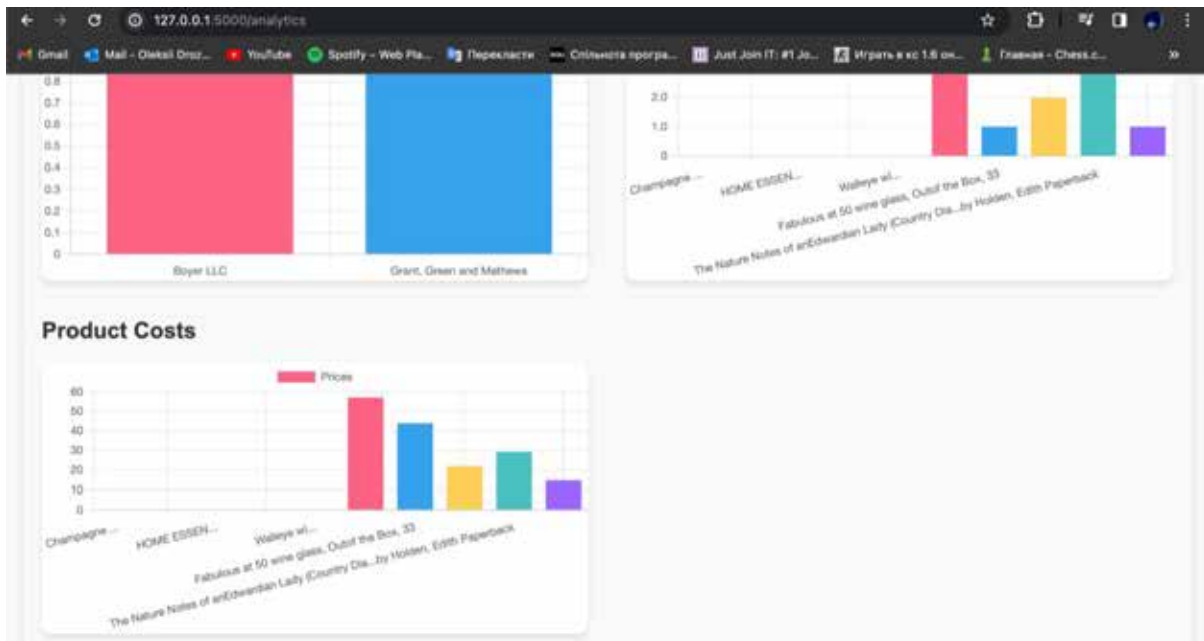


Рис. 7. Сторінка для відображення звітів

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. В даній роботі розроблене програмне забезпечення може сканувати зображення інвойсів, зберігати витягнуті дані в базі даних та надавати аналітику за всіма інвойсами, завантаженими користувачем. Унікальність АІС полягає в тому, що, на відміну від існуючих рішень, які лише сканують інвойси й конвертують їх у такі формати як JSON, вона забезпечує глибший аналіз і зберігання даних.

Результати розпізнавання структурованого тексту за допомогою розробленої архітектури, що лежить в основі програмного забезпечення, показали високу точність при використанні технології OCR. Можливі недоліки, наприклад втрата початкової структури тексту, можуть бути компенсовані комбінацією методів, зокрема нейронної мережі YOLO. Інтеграція YOLO з OCR значно підвищує ефективність системи розпізнавання тексту, забезпечуючи більш точне виявлення текстових об'єктів для подальшого їх розпізнавання. Подальші дослідження можуть зосередитися на вдосконаленні алгоритмів виявлення об'єктів для ще більшої точності та швидкості роботи системи.

Список використаних джерел:

1. Supriyanto S., Maisevli H., Maya S. R., Diena R. R. Multiscale Retinex Application to Analyze Face Recognition. *Jurnal Online Informatika*. 2020. Vol 5. No. 2. P. 217. DOI: <http://dx.doi.org/10.15575/join.v5i2.668> (дата звернення: 01.11.2024)
2. Patel B., Pankaj K. M., Amit K. Lung Cancer Detection on CT Images by using Image Processing. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*. 2018. Vol. 2. Issue 3. P. 2525-2531. DOI: <http://dx.doi.org/10.31142/ijtsrd11674>. (дата звернення: 01.11.2024)
3. Bardhan Y., Tejas A. F., Prabhat R., Shekhar U., Bharate V.D. Emotion Recognition using Image Processing. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*. 2018. Vol. 2. Issue 3. P. 1523-1526. DOI: <http://dx.doi.org/10.31142/ijtsrd10995> (дата звернення: 01.11.2024)
4. Jagan Mohan R. N. V., Vasamsetty C. S., Gupta V. M. N. S. S. V. K. R. Algorithms in Advanced Artificial Intelligence // Prakash I.V., Palanivelan M. A Study of YOLO (You Only Look Once) to YOLOv8. 2024. London. CRC Press. p. 257–266. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003529231> (дата звернення: 01.11.2024)
5. Luo Z., Tian Y. Improved Infrared Road Object Detection Algorithm Based on Attention Mechanism in YOLOv8. *IAENG International Journal of Computer Science*. 2024. Vol. 51, p. 673 – 680. URL: https://www.iaeng.org/IJCS/issues_v51/issue_6/IJCS_51_6_12.pdf (дата звернення: 01.11.2024)
6. Legland D., Marie-Françoise D. ImageM: a user-friendly interface for the processing of multi-dimensional images with Matlab. 2021. *F1000Research*. p. 10-33. DOI: <http://dx.doi.org/10.12688/f1000research.51732.1> (дата звернення: 01.11.2024)
7. Зінченко А. Ю. Проектування розподілених інформаційних систем на основі використання технології слабозв'язаних компонентів. *Системи та технології*. 2023. 63(1), с. 5-14. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2022.1-63.1> (дата звернення: 01.11.2024)

References:

1. Supriyanto S., Maisevli H., Maya S. R., Diena R. R. Multiscale Retinex Application to Analyze Face Recognition. *Jurnal Online Informatika*. 2020. Vol 5. No. 2. P. 217. DOI: <http://dx.doi.org/10.15575/join.v5i2.668> (accessed on: 01.11.2024)
2. Patel B., Pankaj K. M., Amit K. Lung Cancer Detection on CT Images by using Image Processing. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*. 2018. Vol. 2. Issue 3. P. 2525-2531. DOI: <http://dx.doi.org/10.31142/ijtsrd11674>. (accessed on: 01.11.2024)
3. Bardhan Y., Tejas A. F., Prabhat R., Shekhar U., Bharate V.D. Emotion Recognition using Image Processing. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*. 2018. Vol. 2. Issue 3. P. 1523-1526. DOI: <http://dx.doi.org/10.31142/ijtsrd10995> (accessed on: 01.11.2024)
4. Jagan Mohan R. N. V., Vasamsetty C. S., Gupta V. M. N. S. S. V. K. R. Algorithms in Advanced Artificial Intelligence // Prakash I.V., Palanivelan M. A Study of YOLO (You Only Look Once) to YOLOv8. 2024. London. *CRC Press*. p. 257–266. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781003529231> (accessed on: 01.11.2024)
5. Luo Z., Tian Y. Improved Infrared Road Object Detection Algorithm Based on Attention Mechanism in YOLOv8. *IAENG International Journal of Computer Science*. 2024. Vol. 51, p. 673 – 680. URL: https://www.iaeng.org/IJCS/issues_v51/issue_6/IJCS_51_6_12.pdf (accessed on: 01.11.2024)
6. Legland D., Marie-Françoise D. ImageM: a user-friendly interface for the processing of multi-dimensional images with Matlab. 2021. *F1000Research*. p. 10-33. DOI: <http://dx.doi.org/10.12688/f1000research.51732.1> (accessed on: 01.11.2024)
7. Zinchenko A. Yu. Proektuvannia rozpodilennykh informatsiinykh system na osnovi vykorystannia tekhnolohii slabozviazanykh komponentiv. *Systemy ta tekhnolohii*. 2023. 63(1), s. 5–14. DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2022.1-63.1> (accessed on: 01.11.2024).

Погребняк А. В., доктор технічних наук, професор кафедри міжнародного туризму та готельно-ресторанного бізнесу
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-3214-6410

Яковенко В. О., доктор технічних наук, професор кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-7762-5410

Клим В. Ю., кандидат технічних наук, доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-5887-1955

Яковенко Т. Ю., кандидат економічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-1900-8283

ПРОБЛЕМИ ІНТЕГРАЦІЇ ІОТ У КОМП'ЮТЕРНІ МЕРЕЖІ

Стаття розглядає результати дослідження з інтеграції IoT-технологій (Internet of Things, IoT), що дозволяє фізичним пристроям з'єднуватися через мережі та обмінюватися даними без необхідності людського втручання. У цій роботі розглянуто декілька основних наукових статей, які висвітлюють різні аспекти IoT, від його архітектури до викликів безпеки. Аналіз наукових робіт з інтеграції Інтернету Речей (IoT) показує, що ця технологія активно розвивається, охоплюючи різні аспекти, від архітектури до безпеки. Попередні дослідження вказують на важливість подальшого розвитку стандартів, протоколів і технологій для забезпечення безпечної та ефективною інтеграції IoT у різних сферах діяльності. Це, своєю чергою, відкриває нові можливості для інновацій та розвитку в майбутньому.

Метою дослідження визначено аналіз основних проблем інтеграції IoT у комп'ютерні мережі та пропонуються можливі рішення для їх подолання. У межах означеної мети поставлені наступні завдання: надати характеристику глобальної мережі підключених до інтернету пристроїв, які обмінюються даними та взаємодіють між собою; визначити її основні компоненти та рівні, з яких складається її архітектура; порівняти мережеві технології за масштабованістю; проаналізувати та порівняти основні кіберзагрози для IoT; зробити аналіз впливу типу IoT-системи на пропускну здатність мережі; описати особливості основних протоколів, що використовуються IoT-пристроями; проаналізувати переваги використання Software-Defined Networking для вирішення проблеми масштабування; визначити основні методи захисту IoT-систем; порівняти пропускну здатність для різних типів IoT-систем; запропонувати використання енергоефективних технологій для автономної довготривалої роботи IoT-пристроїв; порівняти пропускну здатність та рівні затримки для різних типів IoT-мереж.

Захист даних та забезпечення безпеки мереж IoT є однією з найбільших проблем, оскільки велика кількість підключених пристроїв збільшує вразливість до кібератак. Використання сучасних методів шифрування, аутентифікації та сегментації мережі є ключовими для підвищення безпеки IoT-систем. Інтеграція IoT у комп'ютерні мережі відкриває нові можливості для розвитку інтелектуальних систем у різних сферах, від розумних міст до промислового виробництва. Однак для успішної реалізації необхідно враховувати наведені вище виклики та застосовувати відповідні рішення для їх подолання.

Ключові слова: фізичні об'єкти, комп'ютерні мережі, архітектура IoT, масштабованість, кібербезпека, пропускну здатність, латентність, протокол, енергоефективність, оптимізація, обсяг даних.

Pohrebniak A. V., Yakovenko V. O., Klym V. Yu., Yakovenko T. Yu. Challenges of IoT integration into computer networks

This article examines the results of a study on the integration of Internet of Things (IoT) technologies, which enables interconnection among physical devices and exchange data over networks without human intervention. The paper reviews several fundamental research articles covering various aspects of IoT, from its architecture to security challenges. An analysis of IoT integration research indicates the rapid evolution of this technology addressing multiple aspects ranging from architecture

to security. Highlight the significance of developing standards, protocols, and technologies to ensure secure and efficient IoT integration across various fields, unlocking potential for future innovation and advancement.

The research aims to analyze key challenges of IoT integration into computer networks and suggests potential solutions to overcome them. Objectives within this aim include providing an overview of the global network of internet-connected devices that exchange data and interact with each other, identifying the primary components and layers comprising its architecture, comparing network technologies in terms of scalability, and analyzing major cyber threats to IoT. Further goals include examining assessing the effect of different IoT system types on network bandwidth, detailing key protocols used by IoT devices, analyzing the benefits of Software-Defined Networking (SDN) for scalability issues, identifying key IoT protection methods, comparing bandwidth for different IoT systems, recommending energy-efficient technologies for autonomous IoT device operation, and comparing bandwidth and latency levels for various types of IoT networks.

Data protection and IoT network security remain significant challenges due to the increased vulnerability to cyberattacks from a high number of connected devices. Modern encryption, authentication, and network segmentation methods are crucial for enhancing IoT system security. IoT integration into computer networks creates new opportunities for developing intelligent systems across various domains, from smart cities to industrial production. However, successful implementation requires addressing these challenges and applying appropriate solutions to overcome them.

Key words: physical objects, computer networks, IoT architecture, scalability, cybersecurity, bandwidth, latency, protocol, energy efficiency, optimization, data volume.

Постановка проблеми. Інтернет речей (Internet of Things, IoT) – це концепція, що дозволяє фізичним пристроям з'єднуватися через мережі та обмінюватися даними без необхідності людського втручання. Це веде до нових можливостей у різних галузях економіки, соціальної сфери, екологічних, політичних сегментах життєдіяльності суспільства.

Традиційні комп'ютерні мережі зазвичай не розраховані на велику кількість з'єднаних пристроїв, які постійно генерують дані. Через це виникають численні виклики, пов'язані з безпекою, масштабованістю, керуванням даними та сумісністю протоколів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтернет Речей (IoT) став однією з найважливіших технологічних інновацій сучасності, яка охоплює різноманітні галузі. Він надає можливості для інтеграції фізичних об'єктів у цифровий світ, що відкриває нові горизонти для бізнесу, науки та повсякденного життя. У цьому аналізі розглянемо декілька основних наукових статей, які висвітлюють різні аспекти IoT, від його архітектури до викликів безпеки. Атзори Л., Іера А. та Морабіто Г. (Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. 2010) провели систематичний огляд IoT, акцентуючи на ключових концепціях, таких як об'єкти, що взаємодіють через Інтернет. Вони підкреслили значення даних у формуванні мережі IoT, зазначивши, що інтеграція об'єктів вимагає нових підходів до управління та обробки інформації [1]; Борджія Е. (Borgia E. 2014) описує основні характеристики IoT, включаючи різноманіття застосувань і відкриті питання, що потребують подальшого дослідження. Він підкреслює важливість розуміння не лише технологічних аспектів, але й соціальних і етичних викликів, пов'язаних із впровадженням IoT [2]; Губбі Дж. та інш. (Gubbi, J. et al. 2013) представляють архітектурні компоненти IoT, акцентуючи увагу на їх інтеграції з чинними технологіями. Вони вказують на необхідність розробки нових стандартів та протоколів для забезпечення ефективної роботи IoT [3]; Лі С. та інш. (Li S. et al. 2015) провели систематичний огляд технологій IoT, наголошуючи на їх здатності до адаптації в різних галузях. Вони зазначають, що майбутній розвиток IoT залежатиме від подальшого вдосконалення архітектурних рішень та адаптації до специфічних умов експлуатації [4]; Занелла А. та інш. (Zanella, A. et al. 2014) розглянули, як IoT може бути впроваджений у розумні міста, зокрема в управлінні енергетичними ресурсами, транспортом та безпекою. Вони описують конкретні приклади використання IoT для підвищення ефективності міських систем [5]; Лі І. та Лі К. (Lee, I. & Lee, K. 2015) аналізують вплив IoT на бізнес-середовище, підкреслюючи потенційні переваги та виклики, з якими стикаються підприємства під час впровадження IoT-рішень [6]; Янг Я. та інш. (Yang, Y. et al. 2017) детально досліджують проблеми безпеки та конфіденційності в IoT. Вони відзначають, що значне зростання IoT створює нові ризики та загрози, якими можуть скористатися шахраї, конкуренти чи зловмисники [7]; Фаруг М. У. та інш. (Faroq, M. U. et al. 2015) акцентують увагу на критичних аспектах безпеки IoT, відзначаючи ризики, пов'язані з вразливістю систем. Вони пропонують стратегії для покращення безпеки, включаючи використання криптографічних методів [8]; Чан М. та інш. (Chen, M. et al. 2017) аналізують архітектуру та стандарти комунікацій між машинами (M2M) в контексті IoT. Вони вказують на важливість розробки ефективних стандартів для забезпечення безперервної взаємодії між різними пристроями [9]; Аль-Фуґаха А. та інш. (Al-Fuqaha, A. et al. 2015) пропонують всебічний огляд технологій, які підтримують IoT, включаючи протоколи, платформи та апаратні засоби. Вони підкреслюють важливість інтеграції цих технологій для створення єдиної екосистеми IoT [10]; В.А. Язіна, А.В. Погребняк, О.В. Сабіров (2021), на прикладі впровадження у систему управління сучасного ресторанного закладу електронного меню, доводять значні переваги цієї інновації як для клієнтів, так і для персоналу підприємства і, у цілому, для ресторанного бізнесу [11].

Аналіз наукових робіт з інтеграції Інтернету Речей (IoT) показує, що ця технологія активно розвивається, охоплюючи різні аспекти, від архітектури до безпеки. Попередні дослідження вказують на важливість

подальшого розвитку стандартів, протоколів і технологій для забезпечення безпечної та ефективної інтеграції IoT у різних сферах діяльності. Це, своєю чергою, відкриває нові можливості для інновацій та розвитку в майбутньому.

Мета дослідження. Стаття присвячена аналізу дослідження з основних проблем інтеграції IoT у комп'ютерні мережі та пропонує можливі рішення для їх подолання.

Виклад основного матеріалу дослідження. Інтернет речей можна визначити як глобальну мережу підключених до інтернету пристроїв, які обмінюються даними та взаємодіють між собою. Тож визначимо основні компоненти IoT (Таблиця 1) [1-3]:

- **Пристрої IoT:** сенсори, камери, контролери.
- **Мережеве обладнання:** маршрутизатори, комутатори, шлюзи.
- **Програмне забезпечення:** платформи для обробки даних та аналітики.
-

Таблиця 1

Основні компоненти системи IoT

Компоненти IoT	Функції компонентів
Сенсорне обладнання	Сенсори, що збирають дані з оточення і передають їх через мережу.
Шлюзи	Пристрої, що забезпечують з'єднання між IoT і основними мережами.
Хмарні сервери	Використовуються для обробки, зберігання та аналізу великих даних.
Програмні платформи	Програмні рішення для керування IoT пристроями і обробки інформації.

Розглянемо рівні, з яких складається архітектура IoT (Таблиця 2) [1-3]:

- **Рівень пристроїв:** тут розміщені всі фізичні сенсори та виконавчі пристрої.
- **Шлюзи та мережевий рівень:** забезпечують зв'язок між пристроями та хмарними серверами.
- **Хмарний рівень:** обробляє та аналізує великі масиви даних.

Таблиця 2

Рівні архітектури IoT

Рівень	Функціонал рівня
Рівень пристроїв	Включає фізичні пристрої, що збирають та передають дані.
Шлюзовий рівень	Виконує функцію з'єднання пристроїв із глобальними мережами через мережеве обладнання.
Хмарний рівень	Обробляє та зберігає дані, надаючи користувачам можливість доступу на відстані до керування пристроями.
Аналітичний рівень	Включає інструменти для аналізу зібраних даних і надання користувачам інформаційних рішень.

Однією із ключових проблем інтеграції IoT є масштабованість. Кількість IoT-пристроїв, підключених до мережі, зростає експоненційно, що створює значне навантаження на мережеву інфраструктуру. Традиційні мережі не завжди здатні обробляти велику кількість одночасних з'єднань та обміну даними, що може перевантажити мережі та знизити їх ефективність (Таблиця 3) [2-4].

Таблиця 3

Порівняння здатності мережевих технологій до масштабування

Мережеві технології	Кількість підключень	Швидкість передачі даних	Складність управління
Wi-Fi	Обмежена	Висока	Середня
Ethernet	Обмежена	Дуже висока	Низька
LoRaWAN	Висока	Низька	Складна
5G	Дуже висока	Дуже висока	Складна

Інтеграція IoT підвищує ризики кібербезпеки, оскільки кожен підключений пристрій може стати потенційною точкою уразливості. Кількість атак на IoT-системи постійно зростає, і, на жаль, не всі пристрої мають достатній рівень захисту. Перелік сучасних кіберзагроз для IoT наведено у Таблиці 4 [3, 4, 6-8].

Інтеграція великої кількості IoT-пристроїв може створювати проблеми з пропусковою здатністю мережі, особливо в реальному часі, коли необхідно швидко обробляти й передавати великі обсяги даних. Затримки в передачі можуть критично вплинути на роботу таких систем, як інтелектуальні транспортні мережі, автоматизоване виробництво, сфера послуг та системи охорони здоров'я. (Таблиця 5) [4-7, 15].

Основні кіберзагрози для IoT

Тип атаки	Опис загроз
DoS-атака	Перевантаження мережі, що блокує доступ до сервісів.
Атака «людина посередині»	Перехоплення та модифікація даних між пристроями та сервером.
Несанкціонований доступ	Незаконне отримання контролю над пристроєм або мережею.
Шахрайство, фішинг	Використання соціальної інженерії для крадіжки конфіденційних даних.

Вплив типу IoT- системи на пропускну здатність мережі

Тип IoT-системи	Кількість даних на пристрій	Час передачі даних	Вимоги до затримки
Розумний дім	Низька	Невеликий	Помірна
Інтелектуальний транспорт	Висока	Критичний	Дуже низька
Охорона здоров'я	Середня	Високий	Низька
Промисловий інтернет речей (IIoT)	Висока	Дуже високий	Дуже низька

Одним із важливих викликів є сумісність різних протоколів, що використовуються IoT-пристроями та традиційними мережами. Протоколи, як-от **MQTT**, **CoAP** та **HTTP**, не завжди підтримують взаємодію з усіма мережевими пристроями, що може призвести до ускладнень у передачі даних між різними елементами системи. Перелік основних протоколів, що використовуються у IoT наведено у Таблиці 6 [6-8, 10].

Основні протоколи, що використовуються у IoT

Протокол	Опис призначення протоколу	Сумісність з традиційними мережами
MQTT	Легкий протокол для обміну повідомленнями	Обмежена
CoAP	Протокол для роботи з ресурсами у реальному часі	Середня
HTTP	Основний протокол для передачі гіпертексту	Висока
Zigbee	Протокол для малопотужних мереж	Низька

Багато IoT-пристроїв живляться від батарейок, що створює необхідність ефективного використання енергії. Інтеграція IoT у комп'ютерні мережі вимагає оптимізації як передачі даних, так і енергоефективності для забезпечення довготривалої роботи пристроїв. Використання енергоощадних технологій, таких як **NB-IoT** (Narrowband IoT), може допомогти вирішити цю проблему [7, 9].

Для вирішення проблеми масштабованості необхідно розробляти архітектури мереж, які підтримують динамічне масштабування та адаптацію до зростання кількості пристроїв. Одним із рішень може бути використання **SDN** (Software-Defined Networking), що дозволяє централізовано управляти мережею та швидко адаптувати її до нових вимог. У Таблиці 7 надано порівняльну характеристику традиційної архітектури та **Software-Defined Networking** [8-10].

Переваги використання SDN для IoT

Характеристика	Традиційна архітектура	SDN
Гнучкість	Обмежена	Висока
Управління	Децентралізоване	Централізоване
Масштабованість	Обмежена	Дуже висока
Реагування на зміни	Повільне	Швидке

З метою зниження ризиків, пов'язаних із кібербезпекою, необхідно впроваджувати комплексні рішення для захисту даних та пристроїв. Використання методів **швидкої автентифікації**, **шифрування даних** та **сегментації мережі** допомагає значно підвищити захищеність IoT-систем. Також важливо використовувати засоби моніторингу для виявлення та попередження атак (Таблиця 8) [5-8].

Щоб уникнути проблем із пропускну здатністю та затримками, необхідно використовувати технології, що оптимізують передачу даних у реальному часі. Одним із таких рішень є використання протоколу **5G**, який забезпечує високу швидкість передачі даних та мінімальні затримки, що особливо важливо для критичних IoT-додатків. Порівняльну Таблицю 9 пропускну здатності наведено нижче [7, 9, 15].

Основні методи захисту IoT-систем

Метод захисту	Опис типу захищеності
Шифрування даних	Забезпечує конфіденційність і цілісність переданих даних.
Автентифікація	Перевірка достовірності пристроїв перед з'єднанням із мережею.
Сегментація мережі	Поділ мережі на ізольовані сегменти для зменшення ризиків.
Моніторинг мережі	Виявлення підозрілої активності та запобігання атакам у реальному часі.

Таблиця 9

Порівняння пропускної здатності для різних типів IoT-додатків

Тип IoT-додатка	Вимоги до пропускної здатності	Технології передачі даних
Інтелектуальні транспортні системи	Дуже висока	5G, Wi-Fi 6
Системи охорони здоров'я	Середня	NB-IoT, LTE-M
Розумний дім	Низька	Wi-Fi, Zigbee
Промислові IoT-системи	Висока	Ethernet, 5G

Для підвищення сумісності між різними IoT-протоколами та мережевими технологіями необхідно використовувати **шлюзи протоколів** та платформи для управління пристроями. Ці технології дозволяють поєднувати різні протоколи в єдиній системі та забезпечують ефективну взаємодію між IoT-пристроями.

Для забезпечення тривалої автономної роботи IoT-пристроїв необхідно використовувати енергоефективні технології, такі як **NB-IoT** та **LPWAN**. Вони дозволяють передавати невеликі обсяги даних з мінімальним енергоспоживанням, що особливо важливо для пристроїв, що працюють на батарейках.

Однією з найбільших проблем інтеграції IoT у традиційні комп'ютерні мережі є швидке зростання кількості підключених пристроїв. Згідно з прогнозами, кількість пристроїв IoT продовжуватиме зростати експоненційно. Це створює значне навантаження на наявні мережеві архітектури, які часто не здатні ефективно обробляти та передавати дані від такої кількості пристроїв.

Щоб знайти дані про прогнозоване зростання кількості IoT-пристроїв до 2030 року, можна звернутися до різних джерел. Наприклад, згідно з прогнозом IoT Analytics, очікується, що кількість підключених IoT-пристроїв досягне 18.8 мільярдів у 2024 році, з подальшим зростанням до 2030 року. Цей ріст значною мірою спричинено впровадженням нових технологій, таких як 5G, LTE-M, а також збільшенням кількості пристроїв у промисловому секторі та для розумного дому.

Інший аналіз показує, що глобальний ринок IoT буде продовжувати зростати на 9-10% щорічно, досягнувши до 2030 року значного числа пристроїв через розвиток технологій у галузі штучного інтелекту та промислового Інтернету речей (IIoT). Подібні дані можна знайти в дослідженнях IoT Analytics та Straits Research, які глибоко аналізують розвиток IoT-сектору та ключові тренди [9, 11-15].

Таблиця 10

Прогноз зростання кількості IoT-пристроїв до 2030 року

Рік	Кількість пристроїв (млрд)
2020	12
2023	15
2025	21
2030	29

Окрім зростання кількості пристроїв, інтеграція IoT у мережі також вимагає збільшення пропускної здатності для забезпечення якісної передачі даних у реальному часі. Особливо це стосується промислових систем, де затримки у передачі можуть призвести до серйозних наслідків (Таблиця 11) [9, 10].

Таблиця 11

Вимоги до пропускної здатності для різних типів IoT-мереж

Тип IoT-мережі	Пропускна здатність (Мбіт/с)
Промислові системи	>100
Смарт-домашні системи	10-50
Мобільні IoT-системи	5-15

Для деяких IoT-додатків, таких як системи розумного транспорту чи охорони здоров'я, мінімізація затримок у передачі даних є критично важливою. Технології 5G можуть значно зменшити затримку, забезпечуючи передачу даних практично в реальному часі. (Таблиця 12)[8-10,15] Проте для досягнення цієї мети потрібне подальше розширення мережевої інфраструктури.

Таблиця 12

Порівняння рівнів затримки у різних мережевих технологіях

Технологія передачі даних	Середня затримка (мс)
4G LTE	30–50
Wi-Fi	10–30
5G	<10

Інша серйозна проблема – це ефективне управління величезними обсягами даних, що генеруються IoT-пристроями. Необхідно впроваджувати інноваційні методи для зберігання та аналізу цих даних, щоб забезпечити швидке прийняття рішень та виявлення аномалій у реальному часі.

Часто пристрої IoT працюють в умовах обмеженого енергоспоживання, тому оптимізація витрат енергії є ще одним суттєвим викликом. Технології на основі **NB-IoT** або **LoRa** дозволяють мінімізувати енергоспоживання, однак це може бути недостатнім для деяких видів пристроїв, таких як промислові датчики.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Інтеграція IoT у комп'ютерні мережі є складним, але надзвичайно важливим процесом для забезпечення ефективної роботи сучасних систем. У статті було розглянуто основні проблеми, які виникають при цьому, а також можливі рішення для їх подолання.

Зростання кількості IoT-пристроїв створює суттєві виклики для традиційної мережевої архітектури. Використання таких технологій, як SDN та NFV, дозволяє значно підвищити гнучкість та адаптивність мереж для роботи з великим обсягом пристроїв.

Захист даних та забезпечення безпеки мереж IoT є однією з найбільших проблем, оскільки велика кількість підключених пристроїв збільшує вразливість до кібератак. Використання сучасних методів шифрування, аутентифікації та сегментації мережі є ключовими для підвищення безпеки IoT-систем.

Забезпечення високої пропускну здатності та мінімізації затримок у мережах є важливим для ефективної роботи IoT-додатків, особливо в промисловому секторі. Впровадження технологій 5G та Wi-Fi 6 сприяє вирішенню цієї проблеми.

Багато IoT-пристроїв працюють на батарейках, тому ефективне управління енергією є критичним для їх довготривалої роботи. Використання низькоенергетичних технологій, таких як NB-IoT та LoRa, дозволяє значно продовжити термін роботи пристроїв.

Великий обсяг даних, який генерується пристроями IoT, вимагає використання спеціалізованих рішень для їх зберігання, обробки та аналізу. Використання хмарних технологій та технологій периферійних обчислень допомагає оптимізувати управління даними у реальному часі.

Безсумнівно, інтеграція IoT у комп'ютерні мережі відкриває нові можливості для розвитку інтелектуальних систем у різних сферах, від розумних міст до промислового виробництва. Однак для успішної реалізації необхідно враховувати наведені вище виклики та застосовувати відповідні рішення для їх подолання.

Список використаних джерел:

1. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*. 2010. 54(15), P. 2787-2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
2. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*. 2013. 29(7). P. 1645-1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
3. Li S., Xu L. D., Zhao S. The Internet of Things: A survey. *Information Systems Frontiers*. 2015. 17(2). P. 243-259. <https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7>
4. Borgia, E. The Internet of Things vision: Key features, applications, and open issues. *Computer Communications*. 2014. 54. P. 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.09.008>
5. Perera C., Zaslavsky A., Christen P., Georgakopoulos D. (2014). Context-aware computing for the Internet of Things: A survey. *IEEE Communications Surveys Tutorials*. 2014. 16(1). P. 414-454. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.030214.00183>
6. Zanella A., Bui N., Castellani A. P., Vangelista L., Zorzi, M. Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*. 2014. 1(1). P. 22-32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
7. Lee I., Lee K. The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*. 2015. 58(4). P. 431-440. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>
8. Yang Y., Wu J., Zhang D., Huang, Y. A survey on security and privacy issues in Internet-of-Things. *IEEE Internet of Things Journal*. 2017. 4(5). P. 1254-1272. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2694847>

-
9. Farooq M. U., Shafique M. U., Alqurashi A. A survey on security challenges in Internet of Things (IoT). *International Journal of Computer Applications*. 2015. 119(16). P. 1-8. <https://doi.org/10.5120/19547-1280>
 10. Chen M., Ma Y., Li Y., Wu D., Zhang Y. Machine-to-machine communications: Architectures, standards and applications. *IEEE Communications Magazine*. 2017. 55(4). P. 21-27. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600483>
 11. IoT Analytics. State of the IoT–Number of Connected Devices Continues to Grow Exponentially. IoT Analytics. 2021. Available at: <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-2021-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/>
 12. Statista. Internet of Things (IoT) connected devices worldwide 2019-2030. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>
 13. Straits Research. Global Internet of Things (IoT) Market: Forecast and Trends 2021-2030. Straits Research. Available at: <https://straitsresearch.com/report/internet-of-things-iot-market>
 14. Ericsson. IoT Connections Outlook. Ericsson Mobility Report. 2020. Available at: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/articles/iot-connections-outlook>
 15. В.А. Язіна, А.В. Погребняк, О.В. Сабіров (2021). Електронне меню як ефективний інтерактивний сервіс сучасних підприємств ресторанного господарства. Причорноморські економічні студії. 2021. с. 53-56. <https://doi.org/10.32843/bses.72-32>

References:

1. Atzori L., Iera, A., Morabito, G. (2010) The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*, 54(15), 2787-2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>
2. Gubbi, J., Buyya, R., Marusic, S., & Palaniswami, M. (2013). Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*, 29(7), 1645-1660. <https://doi.org/10.1016/j.future.2013.01.010>
3. Li, S., Xu, L. D., & Zhao, S. (2015). The Internet of Things: A survey. *Information Systems Frontiers*, 17(2), 243-259. <https://doi.org/10.1007/s10796-014-9492-7>
4. Borgia, E. (2014). The Internet of Things vision: Key features, applications, and open issues. *Computer Communications*, 54, 1-31. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2014.09.008>
5. Perera, C., Zaslavsky, A., Christen, P., & Georgakopoulos, D. (2014). Context-aware computing for the Internet of Things: A survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 16(1), 414-454. <https://doi.org/10.1109/SURV.2013.030214.00183>
6. Zanella, A., Bui, N., Castellani, A. P., Vangelista, L., & Zorzi, M. (2014). Internet of Things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal*, 1(1), 22-32. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2014.2306328>
7. Lee, I., & Lee, K. (2015). The Internet of Things (IoT): Applications, investments, and challenges for enterprises. *Business Horizons*, 58(4), 431-440. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2015.03.008>
8. Yang, Y., Wu, J., Zhang, D., & Huang, Y. (2017). A survey on security and privacy issues in Internet-of-Things. *IEEE Internet of Things Journal*, 4(5), 1254-1272. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2017.2694847>
9. Farooq, M. U., Shafique, M. U., & Alqurashi, A. (2015). A survey on security challenges in Internet of Things (IoT). *International Journal of Computer Applications*, 119(16), 1-8. <https://doi.org/10.5120/19547-1280>
10. Chen, M., Ma, Y., Li, Y., Wu, D., & Zhang, Y. (2017). Machine-to-machine communications: Architectures, standards and applications. *IEEE Communications Magazine*, 55(4), 21-27. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2017.1600483>
11. IoT Analytics. (2021). State of the IoT–Number of Connected Devices Continues to Grow Exponentially. IoT Analytics. Available at: <https://iot-analytics.com/state-of-the-iot-2021-12-billion-iot-connections-surpassing-non-iot-for-the-first-time/>
12. Statista. (2021). Internet of Things (IoT) connected devices worldwide 2019-2030. Available at: <https://www.statista.com/statistics/1183457/iot-connected-devices-worldwide/>
13. Straits Research. (2023). Global Internet of Things (IoT) Market: Forecast and Trends 2021-2030. Straits Research. Available at: <https://straitsresearch.com/report/internet-of-things-iot-market>
14. Ericsson. (2020). IoT Connections Outlook. Ericsson Mobility Report. Available at: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/mobility-report/articles/iot-connections-outlook>
15. V.A. Yazina, A.V. Pohrebnyak, O.V. Sabirov (2021). Elektronne menu yak efektyvnyi interaktyvnyi servis suchasnykh pidpriemstv restorannoho hospodarstva. Prychornomorski ekonomichni studii, 53-56. <https://doi.org/10.32843/bses.72-32>

Поперешняк С. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри інформатики та програмної інженерії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-0531-9809

Кравченко Р. В., аспірант
Інституту програмних систем Національної академії наук України
ORCID: 0009-0005-8044-4414

Новіков Ю. Л., кандидат технічних наук,
старший науковий співробітник,
виконуючий обов'язки заступника завідувача відділом
автоматизованих систем програмно-цільового управління № 19
Інституту програмних систем Національної академії наук України
ORCID: 0009-0006-9800-8765

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ РОЗПІЗНАВАННЯ ОСІБ ЗА БІОМЕТРИЧНИМИ ОЗНАКАМИ

Стаття присвячена аналізу сучасних технологій біометричної ідентифікації та їх використанню в різних сферах, таких як безпека, державні та комерційні організації. Основною метою дослідження є всебічне вивчення різних біометричних методів, таких як розпізнавання обличчя, відбитків пальців, райдужної оболонки ока, голосу та інших ознак, з подальшою розробкою рекомендацій щодо їх впровадження. В роботі проведено огляд сучасних методів біометричної ідентифікації, які активно використовуються в різних галузях. У статті досліджено оцінки точності та ефективності біометричних методів у різних умовах використання. Вивчено швидкість і обчислювальні витрати кожного методу, що дозволило порівняти їх за ефективністю. Частина дослідження фокусується на застосуванні методів машинного навчання та штучного інтелекту для покращення точності та швидкості біометричного розпізнавання. Використання глибоких нейронних мереж дозволяє досягати значних покращень у точності, особливо при роботі з великими наборами даних. Машинне навчання також допомагає адаптувати системи до різних умов використання, підвищуючи їх надійність і стійкість до спотворень. У статті запропоновано узагальнену математичну модель для вибору оптимального методу біометричної ідентифікації. Модель базується на багатокритерійному підході, що включає оцінку таких параметрів, як точність, швидкість, надійність, стійкість до зовнішніх впливів та обчислювальні витрати. Це дозволяє вибирати найбільш оптимальний метод для конкретних застосувань. На основі проведеного аналізу сформульовано рекомендації щодо впровадження біометричних систем. Розроблено рекомендації для безпеки, державних структур та комерційних організацій, що включають використання розпізнавання обличчя, відбитків пальців та комбінованих біометричних систем для підвищення ефективності і безпеки. Це дослідження робить внесок у розвиток технологій біометричної ідентифікації, забезпечуючи базу для подальшого впровадження ефективних рішень у різних галузях.

Ключові слова: біометрична ідентифікація, розпізнавання обличчя, відбитки пальців, райдужна оболонка ока, розпізнавання голосу, алгоритм, метод, математична модель, рекомендації.

Popereshnyak S. V., Kravchenko R. V., Novikov Yu. L. Research of personal identification methods by biometric characters

The article is devoted to the analysis of modern biometric identification technologies and their use in various areas, such as security, government and commercial organizations. The main goal of the research is a comprehensive study of various biometric methods, such as face recognition, fingerprints, iris, voice and other features, with further development of recommendations for their implementation. The paper provides an overview of modern biometric identification methods that are actively used in various industries. Algorithms for face recognition based on deep neural networks are considered, which provide high accuracy even in difficult conditions. In addition, fingerprint recognition methods are analyzed, which are widely used due to their availability and reliability. Iris and voice recognition have also been recognized for high accuracy and speed in specific conditions. The article examines assessments of the accuracy and effectiveness of biometric methods in various conditions of use. Important aspects are the quality of the input data (image or signal), lighting conditions, the presence of noise and other external factors that can affect the recognition results. The speed and computing costs of each method were also studied, which made it possible to compare their effectiveness. Part of the research focuses on applying machine learning and artificial intelligence techniques to improve the accuracy and speed of biometric recognition. The use of deep neural networks allows for significant improve-

ments in accuracy, especially when working with large data sets. Machine learning also helps to adapt systems to different usage conditions, increasing their reliability and resistance to distortions. The article proposes a generalized mathematical model for choosing the optimal method of biometric identification. The model is based on a multi-criteria approach, which includes the assessment of such parameters as accuracy, speed, reliability, resistance to external influences and computational costs. This allows you to choose the most optimal method for specific applications. Based on the analysis, recommendations were formulated for the introduction of biometric systems. Recommendations for security, government structures and commercial organizations have been developed, including the use of facial recognition, fingerprints and combined biometric systems to improve efficiency and security. This research contributes to the development of biometric identification technologies, providing a basis for further implementation of effective solutions in various industries.

Key words: biometric identification, face recognition, fingerprints, iris, voice recognition, algorithm, method, mathematical model, recommendations.

Постановка проблеми. В сучасному світі біометричні системи ідентифікації стали однією з найпопулярніших та найефективніших технологій для забезпечення безпеки та верифікації особистості. З розвитком цифрових технологій та зростанням кіберзагроз зростає потреба у більш надійних методах ідентифікації, які можуть забезпечити як зручність для користувачів, так і високий рівень безпеки для державних та комерційних структур. Традиційні способи ідентифікації, такі як паролі або PIN-коди, мають низький рівень захисту через вразливість до крадіжок та шахрайства. У зв'язку з цим, біометричні системи, що використовують унікальні фізіологічні або поведінкові характеристики особи (обличчя, відбитки пальців, голос, райдужна оболонка ока), стали важливою альтернативою для підтвердження особистості.

Попри численні переваги, біометричні системи стикаються з низкою проблем. Перша з них – це залежність точності від якості зібраних даних. Наприклад, системи розпізнавання обличчя можуть помилятися в умовах поганого освітлення або при частковому приховуванні обличчя (маски, окуляри). Друга проблема – це потреба в обчислювальних ресурсах для обробки біометричних даних, особливо при використанні глибоких нейронних мереж. Крім того, виклики з боку конфіденційності та захисту даних залишаються актуальними, оскільки біометрична інформація є надзвичайно чутливою і її компрометація може мати серйозні наслідки.

Таким чином, постає завдання дослідити сучасні методи біометричної ідентифікації, проаналізувати їх ефективність у різних умовах та розробити оптимальні рішення для впровадження цих систем в реальні умови, забезпечуючи при цьому високий рівень точності, надійності та захисту.

Стан дослідження. Огляд сучасної літератури та публікацій за останні роки по даній тематиці свідчить про активний розвиток різноманітних підходів до біометричної ідентифікації. Розглянемо кілька ключових напрямів, що активно досліджувалися останнім часом.

Останнє десятиліття відзначилося активним впровадженням глибоких нейронних мереж (DNN) в біометричні системи, що призвело до суттєвого покращення точності розпізнавання. Такі підходи використовуються для розпізнавання обличчя, відбитків пальців, райдужної оболонки ока та інших біометричних ознак. Наприклад, CNN (Convolutional Neural Networks) стали основою для побудови сучасних систем розпізнавання обличчя завдяки їх здатності автоматично виділяти ознаки зображень, що дозволяє досягати високої точності навіть у складних умовах [1-2].

Мультимодальні системи, що поєднують кілька біометричних ознак, отримали значний розвиток. Такі системи дозволяють підвищити точність і надійність розпізнавання, оскільки вони знижують вплив зовнішніх факторів, що можуть порушити роботу одномодальних систем [3-4].

Захист біометричних систем від підробок (наприклад, фотографій, підроблених відбитків пальців) та виявлення ознак живості користувача стали важливими напрямками досліджень. Алгоритми, що використовують машинне навчання, допомагають розпізнавати фальшиві біометричні дані шляхом аналізу таких факторів, як рух очей, текстура шкіри тощо [5-6].

Іншим важливим напрямком є розвиток легких алгоритмів для мобільних платформ, таких як смартфони та інші портативні пристрої. Впровадження ефективних алгоритмів для обробки біометричних даних на пристроях із обмеженими ресурсами стало викликом, який стимулював розвиток спеціалізованих рішень [7-8].

Ще одна проблема, яка активно досліджується, – це навчання нейронних мереж на малих наборах даних. Для цього використовуються спеціальні методи, такі як трансферне навчання, які дозволяють системам навчатися ефективно навіть за відсутності великих масивів даних для тренування [9].

Сучасні системи біометричного розпізнавання все частіше використовуються в нових контекстах, таких як інтернет речей (IoT) та віртуальні середовища (метавесвіт). Це відкриває нові можливості для застосування біометрії в дистанційній ідентифікації та кібербезпеці, але водночас породжує нові виклики, пов'язані з безпекою та конфіденційністю даних [10].

За останні роки біометричні системи зробили великий крок уперед завдяки впровадженню глибокого навчання, мультифакторної ідентифікації та нових технологій захисту від підробок. Виклики, такі як робота на обмежених пристроях або навчання на малих наборах даних, поступово вирішуються за допомогою

нових алгоритмічних рішень. Розвиток цих систем має потенціал для подальшого впровадження в різних сферах, від безпеки до комерційних і державних послуг.

Метою дослідження є аналіз та порівняння методів розпізнавання осіб за біометричними ознаками, зокрема обличчям, відбитками пальців, райдужною оболонкою ока та іншими характеристиками. Дослідження спрямоване на виявлення найбільш ефективних та точних методів для використання в сучасних системах безпеки та ідентифікації.

Для досягнення поставленої мети сформуємо задачі дослідження:

- Провести аналіз сучасних методів біометричної ідентифікації.
- Оцінити можливості використання методів машинного навчання та штучного інтелекту для покращення точності та швидкості біометричного розпізнавання.
- Дослідити та порівняти оцінки точності та ефективності методів.
- Побудувати узагальнену математичну модель для вибору оптимального методу розпізнавання осіб за біометричними ознаками.
- Розробити рекомендації щодо впровадження біометричних систем.

Результати дослідження допоможуть удосконалити системи безпеки на основі біометричної ідентифікації та забезпечити ефективне впровадження таких технологій у різні галузі.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Огляд сучасних методів біометричної ідентифікації. Біометрична ідентифікація використовує унікальні фізіологічні або поведінкові характеристики особи для підтвердження її особистості. Сучасні методи біометричної ідентифікації забезпечують високий рівень безпеки та точності, що робить їх популярними у сферах безпеки, доступу та контролю. В таблиці 1 наведено основні біометричні методи, які активно використовуються сьогодні.

Кожен метод біометричної ідентифікації має свої переваги і недоліки, залежно від конкретної сфери застосування. У сучасних системах безпеки все частіше використовуються комбінації кількох біометричних методів для підвищення точності та надійності ідентифікації.

Таблиця 1

Огляд сучасних методів біометричної ідентифікації

Метод	Сильні сторони	Недоліки	Застосування
Розпізнавання обличчя	Швидкість і зручність. Системи можуть використовуватися на відстані	Може бути менш ефективним у складних умовах освітлення або при зміні зовнішнього вигляду (маски, окуляри)	Верифікація доступу, системи відеоспостереження, смартфони (Face ID).
Розпізнавання відбитків пальців	Висока точність, широко поширений метод. Доступний навіть на недорогих пристроях.	Потрібен фізичний контакт з датчиком, що може бути незручним або викликати зношування при постійному використанні.	Смартфони, системи контролю доступу, банкомати.
Розпізнавання райдужної оболонки ока	Дуже висока точність, стійкість до підробки, стабільність малюнка протягом усього життя.	Потребує спеціалізованого обладнання і більш високих витрат на впровадження. Застосовується лише на невеликій відстані.	Високорівневі системи безпеки (військові об'єкти, банки, урядові структури).
Розпізнавання голосу	Може використовуватися дистанційно і є зручним для користувачів.	Відносно низька точність порівняно з іншими методами. Звуковий фон або зміни в голосі (хвороба, втома) можуть вплинути на точність розпізнавання.	Голосові асистенти, системи дистанційної верифікації.
Розпізнавання за відбитком долоні	Здатність розпізнавати на великій площі, використовується для високого рівня захисту.	Потребує фізичного контакту, що може обмежувати швидкість використання.	Контроль доступу в офісах, банках або інших захищених об'єктах.
Розпізнавання за венозним малюнком руки	Дуже висока стійкість до підробки, оскільки цей метод неможливо використати за допомогою знімків або інших зовнішніх даних.	Потребує дорогого обладнання та фізичного контакту з сенсором	Високозахищені об'єкти, урядові інституції, банки
Розпізнавання за динамікою руху	Можна використовувати безконтактно, підходить для постійного віддаленого моніторингу.	Низька точність порівняно з фізіологічними ознаками, залежить від умов середовища і може бути чутливою до зовнішніх змін	Системи безпеки на великих об'єктах, системи стеження.

Математичні моделі та алгоритми для біометричної ідентифікації особи

Для біометричної ідентифікації особи використовуються різні математичні моделі та алгоритми, які базуються на аналізі унікальних фізіологічних чи поведінкових характеристик людини. В таблиці 2 наведено основні моделі та алгоритми, які активно застосовуються в системах біометричної ідентифікації (Скорочення, які використані в таблиці 2: розпізнавання обличчя – РА, відбитки пальців – ВП, розпізнавання голосу – РГ, райдужна оболонка ока – РОО).

Короткий опис моделей та алгоритмів для біометричної ідентифікації особи.

1. Алгоритм PCA (Principal Component Analysis) – метод головних компонент. PCA є статистичним методом зниження розмірності даних, який перетворює вхідні дані на менший набір головних компонент.

2. Алгоритм LDA (Linear Discriminant Analysis) – лінійний дискримінантний аналіз. LDA знаходить лінії або гіперплощини, що найбільше розділяють класи, з метою максимізувати відмінності між класами і мінімізувати відмінності всередині одного класу.

3. Алгоритм Eigenfaces використовується для розпізнавання обличчя шляхом побудови базової моделі обличчя у вигляді лінійної комбінації еталонних зображень (eigenfaces).

4. Support Vector Machines (SVM) – метод опорних векторів. SVM є методом класифікації, який знаходить гіперплощину в багатовимірному просторі, що максимально розділяє класи (наприклад, різних осіб).

5. Алгоритми глибокого навчання DL (Deep Learning) – CNN (Convolutional Neural Networks). Конволюційні нейронні мережі (CNN) автоматично вчаться виділяти ключові характеристики з даних, таких як зображення обличчя або відбитків пальців.

6. K-Nearest Neighbors (KNN) – метод найближчих сусідів. В контексті біометрії, це може бути порівняння обличчя з іншими обличчями в базі.

7. Hidden Markov Models (HMM) – приховані моделі Маркова використовуються для розпізнавання голосу і ґрунтуються на ймовірнісному підході до аналізу послідовних даних.

Таблиця 2

Аналіз основних моделей та алгоритмів для біометричної ідентифікації осіб

Назва	Застосування	Переваги	Недоліки	Галузь застосування
Алгоритм PCA	РО	Ефективне зниження розмірності, що робить алгоритм швидшим і менш вимогливим до обчислювальних ресурсів	Менш стійкий до змін освітлення та поворотів обличчя	Системи безпеки, контроль доступу, ідентифікація в громадських місцях
Алгоритм LDA	РО, ВП	Краще справляється з класифікацією, ніж PCA, особливо коли йдеться про багатокласову проблему	Менш ефективний при великих змінах у даних, таких як варіації в позі або освітленні.	Розпізнавання осіб у системах відеоспостереження, безпеки в аеропортах.
Алгоритм Eigenfaces	РО	Простий та ефективний алгоритм для системи розпізнавання	Чутливий до змін в освітленні і виразі обличчя, потребує добрих вихідних зображень для якісної роботи	Розпізнавання у відеоспостереженні, банківських системах, смартфонах
SVM	РО, ВП, РГ	Висока точність, особливо при розпізнаванні складних класів, стійкість до «шуму» в даних	Потребує великого часу для навчання, складний у реалізації для великих систем	Системи високої безпеки, банки, державні системи контролю.
DL та CNN	РО, РОО, РГ, ВП	Висока точність навіть за наявності складних умов. Здатні працювати з великими наборами даних і навчатися складним шаблонам.	Вимагає великої кількості даних для навчання, а також значних обчислювальних ресурсів.	Високотехнологічні системи безпеки, смартфони, програми контролю доступу
KNN	РО, ВП	Простота реалізації та використання	Повільний при великих наборах даних, потребує великих обсягів пам'яті для зберігання даних	Невеликі системи розпізнавання, системи з обмеженими даними.
HMM	РГ	Добре справляються з послідовними даними, можуть моделювати природні зміни в голосі	Чутливі до «шуму», низька точність при обмежених даних	Голосові асистенти, системи безпеки на основі голосу.
DTRF	РО, РГ, РОО	Добре справляються з великими наборами даних, стійкі до перевчення (overfitting).	Можуть бути повільними на великих наборах даних, складні для інтерпретації.	Системи безпеки, аналіз даних у великих компаніях.

8. Decision Trees та Random Forests (DTRF) – дерева рішень та випадкові ліси. Дерева рішень використовують послідовні рішення для класифікації даних (наприклад, чи є це обличчя в базі даних).

Кожен з алгоритмів та моделей має свої переваги і недоліки в залежності від галузі застосування. Наприклад, PCA та Eigenfaces підходять для простих завдань розпізнавання обличчя, тоді як CNN та глибоке навчання забезпечують високу точність у складніших системах, які працюють з великими даними. Використання комбінованих методів, таких як Random Forests та CNN, може забезпечити оптимальне рішення для біометричної ідентифікації, що гарантує високу точність та ефективність.

Аналіз точності та ефективності різних біометричних методів. Для ефективного вибору біометричних методів ідентифікації важливо оцінити їхню точність, швидкість та надійність у різних умовах використання, таких як якість даних, зміни умов освітлення, положення тіла або зовнішній вигляд користувача. В таблиці 3 наведено основні методи біометричної ідентифікації та порівняння їх за цими показниками (Таблиця 3).

Таблиця 3

Порівняльний аналіз методів

Метод	Точність	Надійність	Швидкість	Умови використання
Розпізнавання обличчя	95-98%	Висока	Вразливий до зовнішніх змін	Чутливий до освітлення та зовнішнього вигляду
Відбитки пальців	97-99%	Висока	Надійний, але залежить від стану пальців	Потребує фізичного контакту
Райдужна оболонка ока	99.9%	Середня	Дуже надійний	Потребує близької відстані до сканера
Розпізнавання голосу	70-90%	Середня	Чутливий до шуму та зміни голосу	Залежить від якості запису і умов
Відбиток долоні	99%	Висока	Надійний, але контактний	Потребує фізичного контакту
Венозний малюнок руки	99.9%	Низька	Дуже надійний	Потребує спеціалізованого обладнання
Динаміка ходи	60-80%	Висока	Низька	Працює на великій відстані, чутливий до зовнішніх умов

Провівши порівняльний аналіз методів можна зробити наступні висновки:

- Найбільш точні методи: розпізнавання райдужної оболонки ока та венозного малюнка руки, оскільки вони забезпечують високу точність і надійність навіть у складних умовах.
- Найшвидші методи: розпізнавання обличчя та відбитків пальців – ці методи зручні для масового використання завдяки швидкості обробки даних.
- Універсальні методи: розпізнавання обличчя – один із найпоширеніших методів, але його точність знижується за несприятливих умов. Використання методів на основі відбитків пальців є добре інтегрованим у різні пристрої, але обмежується необхідністю фізичного контакту.

Для досягнення найкращих результатів можна використовувати комбінацію кількох біометричних методів, що дозволяє підвищити точність та надійність ідентифікації, особливо в складних умовах.

Оцінка можливостей використання машинного навчання та ШІ для біометричної ідентифікації.

Розглянемо основні критерії покращення систем біометричної ідентифікації осіб та алгоритми які допоможуть цього досягти.

1. Підвищення точності. Алгоритми глибокого навчання, зокрема CNN і DNN, демонструють значно вищу точність, ніж традиційні методи, оскільки вони здатні вивчати складні патерни та ознаки з великих наборів даних. Рекурентні нейронні мережі (RNN) та їх варіанти (наприклад, LSTM) підвищують точність розпізнавання голосу та динаміки, оскільки вони можуть враховувати контекст послідовностей у даних.

2. Підвищення швидкості. Хоча CNN та DNN вимагають значних обчислювальних ресурсів для навчання, після тренування вони можуть виконувати розпізнавання в реальному часі, що робить їх ефективними для швидких рішень. Алгоритми KNN та SVM мають високу швидкість на етапі ідентифікації, але можуть бути повільними при навчанні або при великій кількості даних.

3. Адаптація до складних умов. Машинне навчання (МН) дозволяє біометричним системам працювати в складних умовах, таких як зміни освітлення, часткові перешкоди або шум. Алгоритми МН можуть «навчатися» на таких умовах і коригувати свої результати. Використання методів регуляризації та навчання на великих обсягах даних дозволяє ШІ-системам розпізнавати обличчя або голос у несприятливих умовах.

4. Захист від підробок. Алгоритми автоенкодерів і CNN використовуються для виявлення підробок у біометричних даних. Методи машинного навчання, такі як SVM або глибокі мережі, можуть бути налаштовані для виявлення аномалій або підозрілих спроб доступу.

Як бачимо, методи МН та ШІ значно підвищують точність, швидкість і надійність біометричних систем розпізнавання. Вони дозволяють автоматизувати процеси виділення ознак, адаптуватися до змін у зовнішньому вигляді користувача та працювати в складних умовах. Глибокі нейронні мережі, конволюційні мережі та рекурентні мережі є найбільш перспективними для розвитку сучасних біометричних систем.

Узагальнена математична модель для вибору оптимального методу розпізнавання осіб за біометричними ознаками

Для побудови узагальненої математичної моделі вибору оптимального методу біометричної ідентифікації необхідно врахувати кілька основних параметрів, що впливають на ефективність кожного методу. Модель базується на багатокритерійному підході, де оцінюються різні фактори, такі як точність, швидкість, надійність, стійкість до зовнішніх впливів та обчислювальні витрати.

Розглянемо основні критерії для оцінки методів:

- Точність (Accuracy, A): точність методу вимірюється як частка правильних ідентифікацій серед усіх спроб ідентифікації.
- Швидкість (Speed, S): час, необхідний для обробки даних та прийняття рішення.
- Надійність (Reliability, R): стійкість методу до зовнішніх впливів, таких як зміна умов освітлення, шум, зміна зовнішності тощо.
- Обчислювальні витрати (Computational Cost, C): кількість ресурсів, необхідних для виконання алгоритму (включає вимоги до процесора, пам'яті, GPU тощо).
- Захист від підробок (Liveness Detection, L): здатність системи виявляти підроблені біометричні дані (наприклад, підроблені відбитки пальців або фотографії обличчя).
- Універсальність (Versatility, V): здатність методу адаптуватися до різних користувачів і різних умов використання.

Побудуємо модель оцінки ефективності методів. Нехай у нас є кілька методів біометричної ідентифікації M_1, M_2, \dots, M_n , кожен з яких можна охарактеризувати набором критеріїв.

Позначимо:

- A_i – точність методу M_i ,
- S_i – швидкість методу M_i ,
- R_i – надійність методу M_i ,
- C_i – обчислювальні витрати методу M_i ,
- L_i – захист від підробок методу M_i ,
- V_i – універсальність методу M_i .

Вводимо функцію ефективності методу $E(M_i)$, яка поєднує всі ці критерії у вигляді зваженої суми:

$$E(M_i) = \omega_A \cdot A_i + \omega_S \cdot S_i + \omega_R \cdot R_i + \omega_C \cdot \frac{1}{C_i} + \omega_L \cdot L_i + \omega_V \cdot V_i,$$

де $\omega_A, \omega_S, \omega_R, \omega_C, \omega_L, \omega_V$ – вагові коефіцієнти для кожного з критеріїв, які відображають їхню важливість для конкретної задачі.

Наведемо пояснення критеріїв:

- Точність (A): Чим більша точність, тим кращий метод. Тому A_i входить у модель зі знаком плюс.
- Швидкість (S): Чим швидше метод, тим краще. Швидкість теж входить у модель зі знаком плюс.
- Надійність (R): Надійність означає стійкість методу до змін умов або атак, і це також позитивний критерій.
- Обчислювальні витрати (C): Чим менші обчислювальні витрати, тим кращий метод. Тому C_i входить у модель з оберненою величиною $\frac{1}{C_i}$.
- Захист від підробок (L): Чим більший рівень захисту від підробок, тим кращий метод.
- Універсальність (V): Універсальні методи, що добре працюють за різних умов та для різних користувачів, також мають вищу цінність.

Щоб критерії були порівнюваними, їх потрібно нормалізувати до інтервалу $[0, 1]$. Для кожного критерію вводимо нормалізовані значення:

$$A_i^{norm} = \frac{A_i - A_{min}}{A_{max} - A_{min}},$$

$$S_i^{norm} = \frac{S_i - S_{min}}{S_{max} - S_{min}},$$

$$R_i^{norm} = \frac{R_i - R_{min}}{R_{max} - R_{min}},$$

$$C_i^{norm} = \frac{C_{max} - C_i}{C_{max} - C_{min}},$$

$$L_i^{norm} = \frac{L_i - L_{min}}{L_{max} - L_{min}},$$

$$V_i^{norm} = \frac{V_i - V_{min}}{V_{max} - V_{min}}.$$

Загальна функція ефективності після нормалізації:

$$E(M_i) = \omega_A A_i^{norm} + \omega_S S_i^{norm} + \omega_R R_i^{norm} + \omega_C C_i^{norm} + \omega_L L_i^{norm} + \omega_V V_i^{norm}.$$

Метод з найбільшим значенням $E(M_i)$ буде вважатися оптимальним для конкретного застосування. Таким чином, вибір оптимального методу зводиться до знаходження максимуму функції ефективності:

$$M_{opt} = \arg \max_{M_i} E(M_i)$$

Вагові коефіцієнти $\omega_A, \omega_S, \omega_R, \omega_C, \omega_L, \omega_V$ визначаються залежно від вимог до системи і можуть змінюватися в залежності від застосування. Наприклад:

– У системах безпеки пріоритетом може бути точність та захист від підробок, тому ω_A і ω_L будуть вищими.

– У комерційних системах, де важливі швидкість та низькі обчислювальні витрати, ваги ω_S і ω_C можуть бути більшими.

Запропонована математична модель дозволяє вибрати оптимальний метод біометричної ідентифікації на основі багатокритеріального аналізу. За допомогою зважених коефіцієнтів модель враховує точність, швидкість, надійність, обчислювальні витрати, захист від підробок та універсальність кожного методу. Це дозволяє гнучко налаштувати модель для конкретних умов і завдань, забезпечуючи оптимальний вибір методу для різних сценаріїв використання.

Рекомендації щодо впровадження біометричних систем

На основі аналізу ефективності біометричних методів розпізнавання осіб можна запропонувати кілька рекомендацій щодо їх впровадження в різних сферах – безпеки (таблиця 4), державних структур (таблиця 5) та комерційних організацій (таблиця 6).

Таблиця 4.

Рекомендації для сфери безпеки

Метод	Рекомендація	Оптимізація
Розпізнавання обличчя з використанням глибоких нейронних мереж (CNN)	Використовувати системи розпізнавання обличчя на основі CNN для забезпечення безконтактної ідентифікації. Ці системи добре підходять для великих об'єктів (аеропорти, вокзали), де потрібно швидко обробляти великий потік людей.	Використовувати багатопланову модель для врахування різних змін зовнішності, таких як зачіски, окуляри або маски. Інтегрувати системи захисту від підробок, наприклад, для виявлення фальшивих облич (фотографій або 3D-моделей).
Розпізнавання райдужної оболонки ока для об'єктів високого рівня безпеки	Використовувати розпізнавання райдужної оболонки ока на об'єктах з підвищеними вимогами до захисту (військові бази, банківські сховища, урядові установи)	Інтеграція із системами доступу з мультифакторною аутентифікацією для забезпечення максимального захисту. Використання інфрачервоного сканування для зменшення впливу зовнішніх факторів

Рекомендації базуються на потребах кожної сфери, а також на особливостях біометричних методів, таких як розпізнавання обличчя, відбитків пальців, райдужної оболонки ока тощо.

Сфера безпеки вимагає високого рівня точності та надійності біометричних систем, оскільки вони повинні працювати в умовах підвищених ризиків і забезпечувати захист від підробок та несанкціонованого доступу.

Державні структури потребують стабільних, надійних і масштабованих рішень, що можуть працювати з великим обсягом даних (Таблиця 5). Такі системи повинні забезпечувати високий рівень безпеки, конфіденційності та відповідати законодавчим вимогам.

Комерційні структури потребують гнучких, економічно доцільних та легко інтегрованих рішень для підвищення зручності та безпеки (Таблиця 6). Біометрія може бути застосована для аутентифікації клієнтів, підвищення зручності при розрахунках та захисту від шахрайства.

Рекомендації для державних структур

Метод	Рекомендація	Оптимізація
Використання відбитків пальців для державних служб	Для систем ідентифікації громадян (паспорти, посвідчення особи, надання державних послуг) варто використовувати розпізнавання відбитків пальців, оскільки це добре інтегрований і надійний метод.	Використовувати захищені бази даних для зберігання відбитків пальців. Інтегрувати в мобільні додатки для забезпечення зручного доступу до державних послуг.
Системи розпізнавання обличчя для контролю доступу та безпеки	Використовувати системи розпізнавання обличчя для контролю доступу до урядових будівель і зони підвищеної безпеки	Встановлення камер з високою роздільною здатністю та системою глибокого навчання для зниження ймовірності помилкової ідентифікації
Інтеграція біометричних систем з державними електронними сервісами	Використовувати біометричні дані для аутентифікації громадян у системах електронного врядування	Розробити уніфіковану платформу для збору і зберігання біометричних даних, яка буде використовуватися для різних державних послуг (видача документів, доступ до соціальних послуг тощо)

Рекомендації для комерційних організацій

Метод	Рекомендація	Оптимізація
Розпізнавання обличчя для рітейлу та фінансових послуг	Використовувати технологію розпізнавання обличчя для аутентифікації клієнтів у банках або при здійсненні покупок в магазинах (безконтактні платежі)	Інтегрувати з мобільними додатками для здійснення безконтактних платежів. Використовувати системи глибокого навчання для виявлення шахрайства або несанкціонованого доступу
Використання біометрії для лояльності клієнтів та персоналізації	Використовувати біометричні системи для персоналізації обслуговування клієнтів (рітейл, готелі, ресторани). Наприклад, розпізнавання обличчя можна використовувати для автоматичного привітання клієнтів або пропонування персоналізованих послуг	Впроваджувати біометричні системи як частину програм лояльності для ідентифікації постійних клієнтів

Впровадження біометричних систем повинно бути адаптоване до конкретних умов використання, забезпечуючи баланс між точністю, безпекою і зручністю для кінцевих користувачів. Це дозволить розширити їхнє застосування в різних сферах – від систем безпеки до комерційних та державних послуг.

Висновки. У даній статті було проаналізовано сучасні підходи до біометричної ідентифікації, такі як розпізнавання обличчя, відбитків пальців, райдужної оболонки ока, та голосу. Проведений аналіз продемонстрував, що кожен із методів має свої переваги і недоліки, які впливають на точність та надійність у різних умовах. Так, системи розпізнавання обличчя на основі глибоких нейронних мереж забезпечують високу точність, але залежать від умов освітлення, тоді як методи розпізнавання відбитків пальців та райдужної оболонки демонструють високу надійність, проте потребують спеціального обладнання для збирання даних.

Одним з ключових результатів дослідження є побудова узагальненої математичної моделі вибору оптимального методу біометричної ідентифікації. Модель базується на багатокритерійному підході, де оцінюються різні фактори, такі як точність, швидкість, надійність, стійкість до зовнішніх впливів та обчислювальні витрати. Окрім цього, досліджено методи машинного навчання, які суттєво підвищують точність та швидкість біометричної ідентифікації, особливо при використанні глибоких нейронних мереж (CNN, RNN). Впровадження таких технологій дозволяє адаптувати системи до різних умов і забезпечувати надійність в режимі реального часу.

На основі проведеного аналізу сформульовано рекомендації щодо впровадження біометричних систем. Розроблено рекомендації для безпеки, державних структур та комерційних організацій.

Подальші дослідження в галузі біометричної ідентифікації мають зосередитися на кількох важливих напрямках:

Розвиток мультимодальних біометричних систем. Поєднання кількох біометричних ознак (наприклад, обличчя і відбитків пальців) може підвищити точність та надійність систем, особливо в умовах, де один з методів може працювати ненадійно.

Покращення захисту від підробок і спроб шахрайства. Розвиток методів виявлення живості користувача (liveness detection) для захисту від атак з використанням фальшивих даних залишається актуальним питанням для підвищення безпеки біометричних систем.

Оптимізація обчислювальних витрат. Важливо продовжити роботу над полегшенням алгоритмів машинного навчання для забезпечення їх ефективної роботи на мобільних платформах і пристроях з обмеженими ресурсами.

Ці напрями досліджень дозволять створювати більш адаптивні, надійні та безпечні системи розпізнавання, які зможуть ефективно працювати в широкому спектрі застосувань – від систем контролю доступу до використання в мобільних додатках і державних структурах.

Список використаних джерел:

1. Minaee S., Abdolrashidi A., Su H. Biometrics recognition using deep learning: a survey. *Artificial Intelligence Review*. 2023. № 56, P. 8647–8695.
2. Ghilom M. Latifi S. The Role of Machine Learning in Advanced Biometric Systems. *Electronics*. 2024. № 13(13), P. 26-67
3. Wang Y., He Z., Wang C., Wei J., Ren M. Biometric Recognition: Latest Advances and Prospects. *Electronics*. URL: https://www.mdpi.com/journal/electronics/special_issues/RIVJJ1NSVM (дата звернення 25.09.2024).
4. Shaheed K., Mao A., Qureshi I. A Systematic Review on Physiological-Based Biometric Recognition Systems: Current and Future Trends. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2021. № 28, P. 4917–4960.
5. Wu W., Li Y, Zhang Y. Identity Recognition System Based on Multi-Spectral Palm Vein Image. *Electronics*. 2023, № 12(16), P. 3503;
6. Kamiński K., Piotr A. Dobrowolski, Piotrowski Z., Ścibiorek P. Enhancing Web Application Security: Advanced Biometric Voice Verification for Two-Factor Authentication. *Electronics*. 2023. № 12(18), P. 3791;
7. Haware S, Barhatte A Retina based biometric identification using SURF and ORB feature descriptors. In: *2017 international conference on microelectronic devices, circuits and systems, ICMDCS 2017*. 2017. pp 1–6
8. Heinsohn D, Villalobos E, Prieto L, Mery D. Face recognition in low-quality images using adaptive sparse representations. *Image and Vision Computing*. 2019. № 85. P. 46–58.
9. Hofbauer H, Jalilian E, Uhl A. Exploiting superior CNN-based iris segmentation for better recognition accuracy. *Pattern Recognition Letters*. 2019. № 120. P.17–23.
10. Keilbach P., Kolberg J., Gomez-Barrero M., Busch C., Langweg H. Fingerprint presentation attack detection using laser speckle contrast imaging. In: *2018 international conference of the biometrics special interest group*, 2018. pp 1–6.

References:

1. Minaee S., Abdolrashidi A., Su H. (2023) Biometrics recognition using deep learning: a survey. *Artificial Intelligence Review*, no. 56, pp. 8647–8695.
2. Ghilom M. Latifi S. (2024) The Role of Machine Learning in Advanced Biometric Systems. *Electronics*, no 13(13), pp. 26-67
3. Wang Y., He Z., Wang C., Wei J., Ren M. (2024) Biometric Recognition: Latest Advances and Prospects. *Electronics*. URL: https://www.mdpi.com/journal/electronics/special_issues/RIVJJ1NSVC.
4. Shaheed K., Mao A., Qureshi I. (2021) A Systematic Review on Physiological-Based Biometric Recognition Systems: Current and Future Trends. *Archives of Computational Methods in Engineering*, no. 28, pp. 4917–4960.
5. Wu W., Li Y, Zhang Y. (2023) Identity Recognition System Based on Multi-Spectral Palm Vein Image. *Electronics*, no. 12(16), pp. 3503;
6. Kamiński K., Piotr A. Dobrowolski, Piotrowski Z., Ścibiorek P. (2023) Enhancing Web Application Security: Advanced Biometric Voice Verification for Two-Factor Authentication. *Electronics*, no. 12(18), pp. 3791;
7. Haware S, Barhatte A (2017) Retina based biometric identification using SURF and ORB feature descriptors. In: *2017 international conference on microelectronic devices, circuits and systems, ICMDCS 2017*. 2017. pp 1–6
8. Heinsohn D, Villalobos E, Prieto L, Mery D. (2019) Face recognition in low-quality images using adaptive sparse representations. *Image and Vision Computing*, no. 85. pp. 46–58.
9. Hofbauer H, Jalilian E, Uhl A. (2019) Exploiting superior CNN-based iris segmentation for better recognition accuracy. *Pattern Recognition Letters*, no. 120, pp.17–23.
10. Keilbach P., Kolberg J., Gomez-Barrero M., Busch C., Langweg H. (2018) Fingerprint presentation attack detection using laser speckle contrast imaging. In: *2018 international conference of the biometrics special interest group*, pp 1–6.

Фірсов О. Д., кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних наук
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-6528-6447

Маріщук А. В., магістрант кафедри інженерії
програмного забезпечення
Дніпровського державного технічного університету
ORCID: 0009-0005-0599-3093

НЕЧІТКА СИСТЕМА АНАЛІЗУ БІЗНЕС ПРАВИЛ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ПІД ЧАС СТВОРЕННЯ БАЗИ ДАНИХ

Об'єктом дослідження є процес розробки нечіткої системи для аналізу бізнес-правил при проектуванні баз даних, зокрема використання нечіткої логіки для обробки неповних і невизначених даних у сучасних бізнес-процесах.

Метою роботи є розробка нечіткої системи для аналізу бізнес-правил предметної області під час проектування бази даних; розробка відповідного програмного забезпечення засобами мови програмування C#, з використанням баз даних SQL для забезпечення адаптивності та гнучкості системи при роботі з нечіткими даними.

Представлено результати аналізу вітчизняної та зарубіжної літератури щодо використання нечіткої логіки в проектуванні баз даних, а також існуючих методів обробки нечітких та неповних даних у бізнес-системах. Огляд включає порівняння різних підходів до застосування нечітких систем у контексті управління даними та проектування баз даних.

Розроблено модель нечіткої системи для аналізу та обробки бізнес-правил, встановлено методи інтеграції нечіткої логіки в процес проектування бази даних, представлено результати тестування системи на реальних бізнес-сценаріях для оцінки її ефективності у порівнянні з традиційними підходами.

Наведено результати розробки програмного забезпечення засобами мови програмування C#, яке дозволяє здійснювати автоматизацію процесу аналізу бізнес-правил та проектування бази даних із врахуванням нечітких і неповних даних, що підвищує адаптивність та точність системи.

В результаті обчислень отримано значення, які можуть бути представлені у вигляді графічних результатів або конкретних числових показників, що вказують на відповідність заданим критеріям чи параметрам.

Аналіз результатів здійснюється на основі порівняння отриманих значень з заздалегідь визначеними межами та бізнес-правилами. Це дозволяє виявити аномалії або відхилення від очікуваних значень, а також визначити, наскільки ефективно працює система для кожної конкретної ситуації.

Зокрема, для кожної отриманої результатної множини здійснюється перевірка її валідності та точності. Це може включати: оцінку ступеня належності елементів до заданої категорії, визначення найбільш значущих факторів, що впливають на результат, порівняння отриманих результатів з попередніми чи контрольними даними для виявлення змін чи трендів.

Ключові слова: нечітка логіка, бази даних, бізнес-правила, нечіткі системи, програмне забезпечення, аналіз даних, адаптивність, інновації в інформаційних системах, C#, SQL, проектування баз даних.

Firsov O. D., Marischuk O. V. Fuzzy system for analysis of business rules of the subject area during database creation

The object of research is the process of developing a fuzzy system for analysing business rules in database design, in particular, the use of fuzzy logic to process incomplete and uncertain data in modern business processes.

The aim of the study is to develop a fuzzy system for analysing business rules of the subject area during database design; to develop the corresponding software using C# programming language, with the use of SQL databases to ensure adaptability and flexibility of the system when working with fuzzy data.

The analytical review presents the results of the analysis of domestic and foreign literature on the use of fuzzy logic in database design, as well as existing methods of processing fuzzy and incomplete data in business systems. The review includes a comparison of different approaches to the use of fuzzy systems in the context of data management and database design.

In the research part, a model of a fuzzy system for analysing and processing business rules is developed, methods for integrating fuzzy logic into the database design process are established, and the results of testing the system on real business scenarios are presented to assess its effectiveness in comparison with traditional approaches.

The application part presents the results of software development using the C# programming language, which allows automating the process of analysing business rules and designing a database taking into account fuzzy and incomplete data, which increases the adaptability and accuracy of the system.

As a result of the calculations, values are obtained that can be presented in the form of graphical results or specific numerical indicators indicating compliance with the specified criteria or parameters.

The analysis of the results is carried out on the basis of comparing the obtained values with predefined limits and business rules. This allows you to identify anomalies or deviations from expected values, as well as determine how effectively the system works for each specific situation.

For each resulting set, its validity and accuracy are checked. This may include: assessing the degree to which elements belong to a given category, determining the most significant factors affecting the result, comparing the obtained results with previous or control data to identify changes or trends.

Key words: fuzzy logic, databases, business rules, fuzzy systems, software, data analysis, adaptability, innovations in information systems, C#, SQL, database design.

Постановка проблеми. У сучасному світі інформаційні технології мають величезний вплив на всі сфери людської діяльності, і сфера управління даними та базами даних не є винятком. Розвиток сучасних інформаційних систем потребує нових підходів до створення та управління базами даних, адже ці системи мають справу з великими обсягами даних, що характеризуються різноманітністю, складністю та постійними змінами. Однією з головних проблем є адаптація традиційних методів до умов, коли необхідно працювати з даними, що містять невизначеність, нечіткість або неповноту.

Це актуалізує проблему створення нових методів і підходів до проектування баз даних, зокрема через використання нечіткої логіки та нечітких систем для аналізу бізнес-правил предметної області. Нечіткі системи, які здатні працювати з нечіткими та неточними даними, є ефективним інструментом для розв'язання цих проблем, оскільки вони дозволяють враховувати варіативність та невизначеність, властиві багатьом реальним бізнес-процесам. Завдяки застосуванню нечітких систем можна створювати бази даних, які більш гнучкі та адаптивні до змінних умов, що, в свою чергу, забезпечує ефективніше управління даними в умовах постійно змінюваного бізнес-середовища.

Актуальність теми обумовлена тим, що традиційні методи побудови баз даних часто не здатні повною мірою врахувати нечіткість, що характерна для багатьох бізнес-процесів. Бізнес-правила предметної області часто мають нечіткий або неповний характер, що призводить до складнощів при створенні баз даних, що повинні точно відображати реальну ситуацію в бізнесі. Врахування нечітких бізнес-правил може значно покращити ефективність роботи бази даних, забезпечуючи точність і гнучкість її структури.

Використання нечіткої логіки дозволяє створити такі системи, які можуть працювати з неповними, суперечливими та нечіткими даними, що є важливим аспектом для бізнесу, де точність даних може бути варіативною або не завжди визначеною. Зокрема, для великих підприємств або компаній, що працюють в динамічних умовах, створення бази даних, здатної адаптуватися до змін, є ключовим фактором для ефективного управління.

У останні десятиліття ми спостерігаємо стрімкий розвиток інформаційних технологій і, зокрема, методів обробки та зберігання даних. Бази даних стали невід'ємною частиною будь-якої організації, від малого бізнесу до великих корпорацій. Традиційні реляційні бази даних продовжують використовуватись, однак для вирішення задач, де має місце нечіткість і варіативність, реляційні моделі не завжди є ефективними. У цих умовах не можна обмежуватись лише класичними методами, і виникає потреба в застосуванні нових підходів.

Одна з таких нових технологій – нечітка логіка. Нечітка логіка дозволяє працювати з набагато більш широким діапазоном вхідних даних і дозволяє приймати рішення, навіть якщо точність цих даних невисока. Такий підхід дозволяє створювати системи, які краще адаптуються до реальних умов бізнесу, де дані можуть бути неповними або не до кінця визначеними.

Крім того, важливим аспектом є інтеграція новітніх методів із вже існуючими технологіями баз даних. Розробка нових інструментів, які б дозволяли враховувати нечіткість при проектуванні і функціонуванні баз даних, є однією з найбільш актуальних тенденцій у розвитку галузі. Такий підхід дозволить зменшити людський фактор при управлінні даними і покращити якість прийнятих рішень.

Основною метою цього дослідження є розробка нечіткої системи для аналізу бізнес-правил предметної області під час створення відповідної бази даних. Для досягнення цієї мети потрібно вирішити кілька важливих завдань:

- розробити модель нечіткої системи, здатної працювати з бізнес-правилами;
- визначити методи інтеграції нечіткої логіки в процес проектування бази даних;
- оцінити ефективність такої системи на прикладі реальних бізнес-сценаріїв;
- порівняти результати використання нечіткої системи з традиційними підходами до проектування баз даних.

Очікувані результати цієї роботи мають практичне значення для автоматизації процесу проектування баз даних і можуть бути використані в різних галузях, де потрібна обробка великої кількості даних з невизначеністю або неповнотою.

Розробка нечіткої системи для аналізу бізнес-правил має важливе значення для підвищення ефективності проектування баз даних. Очікується, що цей підхід дозволить значно полегшити процес створення

бази даних, зменшити ймовірність помилок, а також забезпечить більшу адаптивність до змінюваних умов бізнесу. Завдяки цьому підприємства зможуть швидше реагувати на зміни в зовнішньому середовищі та вдосконалювати свою інфраструктуру.

Оскільки більшість сучасних бізнес-даних має невизначену природу, застосування нечіткої логіки для їх аналізу відкриває нові можливості для ефективного управління і прийняття рішень. Таким чином, значення цього дослідження полягає не лише в його теоретичній цінності, але й у його практичній користі для сучасних інформаційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальність розроблення нечіткої системи для аналізу бізнес-правил предметної області під час створення відповідної бази даних обумовлена кількома ключовими факторами.

По-перше, у сучасному бізнес-середовищі існує потреба в ефективному управлінні інформацією, що часто характеризується великою кількістю даних з різними типами і структурою. Бізнес-правила визначають, як саме ці дані повинні оброблятися, зберігатися та використовуватися в процесах прийняття рішень. Однак традиційні підходи до моделювання бізнес-правил часто не здатні враховувати їхню складність, неоднозначність та динамічність.

По-друге, сучасні інформаційні системи повинні мати можливість адаптуватися до змінних умов бізнес-середовища. Нечітка логіка, як підхід до моделювання, дозволяє ефективно працювати з невизначеністю та неповними даними, що є типовим для реальних бізнес-процесів. Це забезпечує більш точне відображення бізнес-правил, які можуть бути суб'єктивними або варіативними, оскільки їх застосування може залежати від конкретних ситуацій чи умов.

По-третє, використання нечітких систем може призвести до підвищення точності та надійності рішень, що приймаються на основі аналізу бізнес-правил. Це, у свою чергу, дозволяє зменшити ризики, пов'язані з помилками в обробці даних, і підвищити загальну ефективність інформаційних систем.

Оскільки автоматизація бізнес-процесів стає все більш важливою для конкурентоспроможності організацій, розробка нечіткої системи для аналізу бізнес-правил є необхідним кроком у напрямку створення адаптивних, ефективних та точних баз даних. Це дослідження не тільки відповідає потребам сучасного ринку, але й сприяє розвитку нових підходів у сфері управління інформацією та базами даних.

Таким чином, дослідження актуальності розроблення нечіткої системи для аналізу бізнес-правил під час створення бази даних є важливим внеском у теорію та практику автоматизації бізнес-процесів, що, безумовно, має наукову і практичну цінність.

В Україні актуальність нечіткої системи для аналізу бізнес-правил предметної області – це, наприклад, така система як нечітка модель оцінки кредитоспроможності фізичних осіб. На сьогоднішній день прийняття рішень у інвестиційній діяльності за умов невизначеності досліджують такі вчені, як: Ю.П. Зайченко [1], А.В. Матвійчук [2], О.О. Недосекін [3], В.Г. Чернова [4]. Основний математичний апарат, що використовується дослідниками – це теорія нечітких множин.

Згідно з досвідом, для представлення критеріїв оцінки суб'єктів господарювання, запропонованих експертами, доцільно використовувати нечітку логіку з типами функцій належності [5].

Трикутні функції належності є найхарактернішим прикладом кусково-лінійних функцій. У нашому випадку кожна з розглядуваних функцій належності задається на інтервалі значень відповідних коефіцієнтів.

Сформулюємо всі критерії оцінки суб'єктів, які, можуть бути представлені у вигляді трикутної функції належності [6].

1. Коефіцієнт загальної ліквідності.

Коефіцієнт загальної ліквідності розраховується як відношення оборотних активів до поточних зобов'язань [7]. Позначимо цю величину K_1 таким чином:

$$\begin{cases} K_1' * 0,09; \text{ якщо } K_1' \text{ менше середнього значення коефіцієнта по галузі;} \\ K_1'; \text{ якщо } K_1' \text{ співпадає із середнім значенням коефіцієнта по галузі;} \\ K_1' * 1,1; \text{ якщо } K_1' \text{ більше середнього значення коефіцієнта по галузі.} \end{cases}$$

Функція належності для величини K_1 буде записана як:

$$\mu(K_1; 1; 1.75; 2.5) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } K_1 \leq 1; \\ \frac{4(K_1 - 1)}{3}, & \text{якщо } 1 < K_1 \leq 1.75; \\ \frac{c - x}{c - b}, & \text{якщо } 1.75 < K_1 < 2.5; \\ 0, & \text{якщо } K_1 \geq 2.5. \end{cases}, \quad (1)$$

2. Коефіцієнт фінансової незалежності.

Коефіцієнт фінансової незалежності відображає рівень автономії підприємства від зовнішніх запозичень [8]. Він визначається як відношення загальної суми власних коштів до підсумку балансу. Цей коефіцієнт показує частку власного капіталу в загальному обсязі ресурсів, вкладених у його діяльність. Чим вищий коефіцієнт, тим фінансово стабільніше підприємство і менше залежить від зовнішніх кредиторів та інвесторів.

Коефіцієнт фінансової незалежності розраховується за такою формулою:

$$K_2' = \left(\begin{array}{l} \text{Забезпечення наступних витрат і цільове фінансування} + \\ + \text{Довгострокові зобов'язання} + \text{Поточні зобов'язання} \end{array} \right) / \text{Власний капітал}$$

Тоді запишемо величину K_2 наступним чином:

$$\begin{cases} K_2' * 0,09; \text{ якщо } K_2' \text{ менше середнього значення коефіцієнта по галузі;} \\ K_2'; \text{ якщо } K_2' \text{ співпадає із середнім значенням коефіцієнта по галузі;} \\ K_2' * 1,1; \text{ якщо } K_2' \text{ більше середнього значення коефіцієнта по галузі.} \end{cases}$$

Функцію належності побудуємо наступним чином:

$$\mu(K_2; 0; 1; 2) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } K_2 \leq 0; \\ K_2, & \text{якщо } 0 < K_2 \leq 1; \\ 2 - K_2, & \text{якщо } 1 < K_2 < 2; \\ 0, & \text{якщо } K_2 \geq 2. \end{cases} \quad (2)$$

3. Коефіцієнт маневреності власних коштів.

Коефіцієнт маневреності власних коштів визначається як різниця між власним капіталом та необоротними активами, поділена на власний капітал [9]. Цей показник демонструє, наскільки мобільні власні фінансові ресурси підприємства. Його значення може змінюватися в залежності від структури капіталу та галузі, до якої належить підприємство. Бажано, щоб коефіцієнт маневреності поступово зростав, але раптове його збільшення може бути недоцільним, оскільки це призведе до зниження інших показників, наприклад, коефіцієнта автономії, що збільшує залежність підприємства від кредиторів [10].

Позначимо цю величину K_3 таким чином:

$$\begin{cases} K_3' * 0,09; \text{ якщо } K_3' \text{ менше середнього значення коефіцієнта по галузі;} \\ K_3'; \text{ якщо } K_3' \text{ співпадає із середнім значенням коефіцієнта по галузі;} \\ K_3' * 1,1; \text{ якщо } K_3' \text{ більше середнього значення коефіцієнта по галузі.} \end{cases}$$

Функцію належності побудуємо наступним чином:

$$\mu(K_3; 0; 0.5; 1) = \begin{cases} 0, & \text{якщо } K_3 \leq 0; \\ 2K_3, & \text{якщо } 0 < K_3 \leq 0.5; \\ 2 - 2K_3, & \text{якщо } 0.5 < K_3 < 1; \\ 0, & \text{якщо } K_3 \geq 1. \end{cases} \quad (3)$$

Згідно з наведеними даними, розвиток нечіткої системи для аналізу бізнес-правил, зокрема в контексті оцінки кредитоспроможності фізичних осіб, є надзвичайно актуальним для України. Нечітка логіка дозволяє враховувати як кількісні, так і якісні фактори, що є критично важливими в умовах невизначеності, характерних для сучасного економічного середовища. Використання експертних оцінок для визначення критеріїв стабільності роботи підприємств може суттєво підвищити точність оцінок та знизити ризики [11].

Використання трикутних, S-подібних та інших функцій належності дає змогу ефективно моделювати різноманітні бізнес-ситуації, адже ці функції можуть відображати складні відносини між змінними, які не піддаються чітким кількісним вимірюванням [12]. Це особливо важливо для підприємств, де фактори, що впливають на фінансову стабільність, можуть змінюватися під впливом зовнішніх та внутрішніх умов.

Наприклад, функції належності для коефіцієнтів загальної ліквідності, фінансової незалежності та маневреності власних коштів дозволяють більш точно аналізувати фінансове становище підприємства, що, в свою чергу, може впливати на прийняття рішень щодо інвестицій та кредитування. Врахування нечітких критеріїв у бізнес-аналізі забезпечує більш гнучкий підхід до оцінки, що відповідає реаліям сучасного бізнес-середовища в Україні [13-14].

Загалом, впровадження нечітких систем в управлінні фінансами підприємств сприяє не тільки підвищенню ефективності прийняття рішень, але й формує надійний фундамент для подальших досліджень та розробок у сфері автоматизації бізнес-процесів, що вимагає адаптації до змінюваних умов ринку.

Медичні працівники демонструють різноманітність у прийнятті рішень через різні підходи до управління невизначеністю та неясністю в знаннях і інформації. Діагностичні рішення також залежать від досвіду, експертності та сприйняття практикуючого лікаря [15]. Оскільки складність системи зростає, дотримуватись певного шляху діагностики без помилок стає нелегко. Нечітка логіка пропонує потужні методи міркування, які можуть справлятися з невизначеністю та неясністю. Нечіткі експертні системи (НЕС) визначають неточні знання та пропонують лінгвістичні концепції, які добре наближаються до медичних текстів [16].

Нечітка логіка є методом, що дозволяє уточнити те, що є нечітким у сфері медицини. НЕС відіграють важливу роль у медицині для симптоматичної діагностики [17, 18]. Література, опублікована на тему НЕС у медичній діагностиці, охоплює широкий спектр, включаючи огляди, застосування, інновації, концептуальні дослідження та розробку діагностичних інструментів. Співпраця між медичними науковцями та комп'ютерними інженерами призвела до міждисциплінарного прогресу у розвитку інтелектуальних допоміжних інструментів і систем [19].

Звітні системи використовуються для моніторингу пацієнтів, прогнозування стану, обробки нечітких запитів у медичних застосуваннях, а також для оцінки та порівняння їх ефективності з існуючими практиками [20]. Область застосування НЕС знайшла своє застосування у діагностиці, диференціальній діагностиці, терапії, аналізі зображень, розпізнаванні образів, моніторингу пацієнтів, аналізі медичних даних, банках даних, текстовому аналізі та в теорії: багатозначна логіка, нечіткі відносини, теорія нечітких множин, нечітка класифікація тощо. Минулі дослідження сприяли розвитку діагностичних технік, кількісній оцінці медичної експертності, трансферу знань, виявленню патернів використання та застосуванню НЕС, а також їх впровадженню в практику медичних працівників [21].

Розуміння та прийняття рішень людиною є нечіткими, оскільки вони передбачають значний ступінь неясності в доказах і використанні концепцій та вимагають високого рівня управління невизначеністю в медичній діагностиці. Є кілька джерел неточності та невизначеності в галузі експертних систем. Розв'язання проблем у цій сфері може бути неточним [22]. Наприклад, це стосується більшості медичних проблем. Дослідники запропонували безліч інноваційних нечітких експертних систем для вирішення питань неясності та складності, надаючи практичні інструменти користувачам у формі нечітких експертних систем [23]. Інтелектуальні медичні системи створюються з акцентом на конкретні захворювання для підтримки процесу прийняття рішень [24]. Спостереження за пацієнтами, прогнозування стану, обробка нечітких запитів, а також оцінка та порівняння результатів з існуючими практиками також є сферами інтересу дослідників [25]. Розроблено освітні інструменти, що використовують підходи нечіткої логіки для підтримки користувачів.

У наведених дослідженнях обговорюються потреба, важливість, потенціал, необхідність нечіткої класифікації та підходи до проектування експертних систем для медичної діагностики [26]. Деякі дослідження були проведені для перевірки придатності теорії нечітких множин та її похідних теорій для розробки систем на основі знань та нечітких множин для моделювання медичних концепцій [27]. Системи підтримки прийняття рішень для діагностики людських хвороб значно допомогли пацієнтам і лікарям. Розробники розширили використання теорії нечіткої логіки при проектуванні експертних систем, специфічних для захворювань, та систем прийняття рішень для поширених хвороб. Нечіткий підхід був досліджений для вирішення проблеми невизначеності у стилі мислення лікаря та комп'ютеризованих експертних систем для прийняття рішень [28,38].

Комп'ютеризовані додатки для діагностики та лікування пацієнтів, здається, є більш новою сферою інтересу. Веб-орієнтовані нечіткі експертні системи були представлені для діагностики людських захворювань [29].

Сфери застосувань, які не пов'язані із захворюваннями, охоплюють: рентгенівську мамографію, інтерпретацію мамографічних і ультразвукових зображень, електрографічне дослідження людського тіла [30]. Нечітка експертна система для різних звуків, що виробляються різними органами в людському тілі, також була описана, використовуючи інструментарій нечіткої логіки MATLAB. Застосування нечіткої експертної системи та дерева рішень для вибору засобу в гомеопатії є одним із рідкісних застосувань. Інші сфери застосування нечіткої логіки включають: прогнозування аневризми, загоєння переломів та нестационарні нечіткі експертні системи, інтуїціоністські нечіткі множини [31].

Нечітка експертна система довела свою корисність у медичній діагностиці для кількісного аналізу та якісної оцінки медичних даних, що, в свою чергу, забезпечує точність результатів [32]. Комп'ютерні діагностичні інструменти та бази знань безперечно допомагають для ранньої діагностики захворювань. Розвиток веб-орієнтованих застосувань і інтерфейсів дозволив медичним працівникам ділитися своїм досвідом і знаннями по всьому світу. Спостерігається, що розвиток специфічних для захворювання застосувань за допомогою нечітких експертних систем є найбільшою сферою інтересу дослідників, які присвятили їй 44% своїх досліджень [33,37].

Як і в багатьох економічних задачах, під час розрахунків показників інвестиційного проекту економісти стикаються з проблемами неповноти, нечіткості або невизначеності вхідних даних. Для вирішення цих проблем існує безліч методів, наприклад, статистичні або мінімаксні, але на практиці вони не завжди ефективні, а іноді навіть непридатні. Найбільш адаптованим до цих проблем виявився апарат, заснований на теорії нечітких множин.

Прикладом, що ілюструє переваги «нечіткого підходу», є задача оцінки таких показників інвестиційних проектів, як чиста поточна вартість доходу (NPV) та внутрішня ставка прибутковості (IRR). У них поєднуються нечіткість і невизначеність даних, а також розпливчастість умов, в яких реалізується проект.

Наразі починають з'являтися інформаційні ресурси, що агрегують дані про діяльність сотень українських корпорацій. Весь цей обсяг даних ще не був серйозно досліджений, і не було ясності в тому, як аналізувати різноманітну кількість кількісної та якісної інформації в єдиній системі. Однак, сьогодні цей підхід до аналізу економічних даних починає формуватися під назвою Fuzzy Economics. Завдання полягає в тому, щоб на основі розробленої методології створити систему інтелектуального аналізу, що проводить аналітичну обробку даних і вироблення оптимальних економічних рішень.

Перерахуємо характерні економічні задачі, де застосування нечітких обчислень досягає вражаючих результатів:

Стратегічне планування. Оцінка бізнесів, опис стану ринків і конкурентоспроможності, а також аналіз сильних і слабких сторін підприємств – це кваліметричні задачі, які можуть бути успішно поставлені і вирішені у нечіткій формі. Саме на цьому принципі працює система стратегічного планування, реалізована у міжнародному регіональному співтоваристві Сіменс.

Комплексний аналіз стану корпорації. Ще одна кваліметрична задача. Важливо виявити чинники та оцінити їх ієрархію з відповідними системами пріоритетів. У простому випадку, коли всі чинники представлені у вигляді вектора, комплексна оцінка може бути отримана за допомогою двовимірної матричної агрегації поточних якісних рівнів чинників. У рамках цього підходу можна одночасно аналізувати всі аспекти діяльності корпорації (фінанси, управління, процеси, задоволеність клієнтів, стратегічне положення тощо).

Прогнозування фондових індексів. Якщо побудувати макроекономічну модель, в якій екзогенні чинники виступають прогнозними рівнями макроекономічних параметрів регіону, де випускаються цінні папери, а виходами моделі є фондові індекси, то прогнози і зв'язки між чинниками можуть бути нечіткими. Відповідно, результуючі прогнози фондових індексів будуть представлені у формі нечітких функцій.

Транспортна логістика. Якщо сегменти транспортної мережі мають нечітку тривалість перевезення, розумно вибрати маршрут, що має з одного боку мінімальну середню тривалість, а з іншого – максимальну ймовірність прибуття за графіком. Класичні моделі, на жаль, не дозволяють вирішити цю проблему.

Управління запасами. Хоча існує багато детермінованих моделей для оптимізації управління запасами, виявляється, що справжня проблема з управлінням запасами на підприємствах зазвичай має нечіткий характер, зумовлений розпливчастістю критеріїв, що використовуються для оцінки стану запасів, при прогнозуванні потреб у матеріалах і елементах для виробництва [36].

Мета статті. Для розробки нечіткої системи, що використовується для аналізу бізнес-правил предметної області, необхідно вибрати математичні методи, які дозволяють ефективно працювати з невизначеністю, нечіткістю і неповнотою даних. Одним із основних таких методів є нечітка логіка, яка базується на теорії нечітких множин. Вона дає змогу оперувати з даними, що мають варіативність і нечіткість, і застосовується для аналізу й прийняття рішень у ситуаціях, де традиційні підходи не дають точних результатів.

Окрім цього, для досягнення високої гнучкості та ефективності моделювання, ми використовуємо моделювання нечітких систем на основі нечітких множин та нечітких алгоритмів прийняття рішень, таких як нечіткі регресійні моделі та нечіткі когнітивні карти. Вибір цих методів зумовлений здатністю працювати з наборами даних, де елементи не мають чітких меж або визначених значень, а також можливістю комбінувати різні джерела даних і оцінок.

У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій, зокрема в процесі проектування баз даних, існує багато проблем, пов'язаних з аналізом та обробкою великих обсягів даних. Враховуючи їхню складність, неповноту та нечіткість, традиційні підходи, засновані на класичних математичних моделях і методах, часто не здатні адекватно описати та вирішити поставлені завдання. Тому виникає потреба у застосуванні нових, більш ефективних математичних методів, що дозволяють працювати з даними, що мають непевність або нечіткість. Одним із таких методів є нечітка логіка, що є основою для розробки нечітких систем, здатних обробляти і аналізувати нечіткі бізнес-правила.

Аналіз бізнес-правил предметної області є важливою частиною процесу проектування бази даних. Багато бізнес-правил можуть бути нечіткими або суперечливими. Наприклад, в процесі пов'язаних з обробкою замовлень, ціни товарів, попиту на продукцію або прогнозування бізнес-стратегії можуть бути визначені не тільки через чіткі числові величини, але й через нечіткі категорії, такі як «високий попит», «середній рівень ризику» або «низька ймовірність». В цих випадках використання традиційних моделей для точного моделювання бізнес-правил стає складним або неможливим.

Однак, оскільки основною проблемою є аналіз нечітких, суперечливих та неповних даних, нечітка логіка є найбільш підходящим математичним методом для реалізації цієї задачі. Вона дозволяє забезпечити високий рівень гнучкості та адаптивності, що є важливим для проектування сучасних баз даних, які повинні ефективно працювати в умовах постійних змін і невизначеності.

Отже, вибір нечіткої логіки як основного математичного методу для розробки нечіткої системи для аналізу бізнес-правил є обґрунтованим та ефективним. Нечітка логіка дозволяє вирішувати задачі, пов'язані з обробкою нечітких, суперечливих або неповних даних, що є характерними для бізнес-процесів. Її використання в процесі створення баз даних дозволяє забезпечити більш точне, адаптивне та гнучке управління бізнес-процесами, що є ключовим фактором для успішної роботи в сучасному бізнес-середовищі.

Виклад основного матеріалу. Розробка методики дослідження є важливим етапом на шляху до створення нечіткої системи для аналізу бізнес-правил під час проектування бази даних. Методика визначає послідовність дій та застосовувані методи, що дозволяють досягти поставленої мети, а також забезпечує обґрунтованість результатів та їх узгодженість з теоретичними і практичними вимогами.

Перший етап дослідження полягає в зборі та аналізі вимог до розроблюваної нечіткої системи. Це критичний крок, оскільки саме на основі цих вимог буде побудована модель та визначено функціонування системи. Аналіз вимог включає кілька етапів:

- формулюванні мети розробки нечіткої системи для аналізу бізнес-правил. Метою є створення моделі, яка б допомогла автоматизувати аналіз і перевірку бізнес-правил, зокрема тих, які містять нечіткі або суперечливі дані.

- визначення, з яких джерел будуть надходити дані для аналізу. Це можуть бути існуючі бази даних, документи, зовнішні інформаційні системи або дані, зібрані під час дослідження. Важливо з'ясувати, яка частина даних є нечіткою або неповною, що вимагатиме застосування нечіткої логіки.

- формулювання критеріїв, за якими буде оцінюватися ефективність розробленої системи. Це можуть бути точність результатів, здатність до адаптації до змін у даних, зручність інтеграції з іншими системами тощо.

Другий етап методики включає безпосередню розробку математичних моделей нечіткої системи, яка буде застосовуватися для аналізу бізнес-правил. Цей етап складається з підетапів:

- вибір конкретної моделі, який залежить від особливостей предметної області та типу бізнес-правил, які аналізуються. Для цього можуть бути застосовані такі моделі, як нечіткі регресійні моделі, нечіткі когнітивні карти чи нечіткі нейронні мережі.

- створення нечітких множин, які описують категорії цих параметрів.

- створення нечітких правил.

- створення механізму дефузії, який перетворює нечіткі результати в чіткі, зручні для прийняття рішень.

Наступним кроком є інтеграція розробленої нечіткої системи в процес проектування бази даних. Це дозволяє забезпечити автоматизований аналіз бізнес-правил безпосередньо в процесі роботи з базою даних, що підвищує ефективність та знижує ймовірність помилок при введенні і перевірці даних.

Далі необхідно розробити структуру бази даних, яка буде містити всі необхідні таблиці та зв'язки для збереження бізнес-правил і результатів їх аналізу. Важливою частиною є правильне проектування структури даних для зберігання нечітких величин та правил.

Оскільки система буде використовуватися людьми для аналізу бізнес-правил, необхідно розробити зручний інтерфейс, який дозволяє вводити дані, перевіряти бізнес-правила та отримувати результати.

Важливою частиною є забезпечення інтеграції розробленої нечіткої системи з іншими програмними продуктами та базами даних, що можуть бути використані в процесі аналізу даних. Це дозволяє забезпечити більш ефективну роботу в рамках єдиної інформаційної екосистеми.

Останнім етапом методики дослідження є тестування та валідація розробленої моделі. Це дозволяє оцінити ефективність створеної системи, перевірити її на реальних даних та з'ясувати, чи досягаються поставлені цілі.

Розробка методики дослідження для створення нечіткої системи для аналізу бізнес-правил включає важливі етапи збору вимог, моделювання, інтеграції та тестування. Кожен етап має свої завдання та методи, які забезпечують успішне вирішення поставленої задачі. У результаті дослідження буде створена гнучка та адаптивна система, здатна ефективно працювати з нечіткими даними та забезпечити автоматизований аналіз бізнес-правил [39].

У контексті розробки нечіткої системи для аналізу бізнес-правил предметної області під час створення відповідної бази даних задача моделювання спрямована на створення математичних моделей, які дозволяють врахувати нечіткість, суперечливість та неповноту даних, що мають місце в реальних бізнес-процесах. Це дозволить значно покращити процес аналізу і прийняття рішень у галузі проектування баз даних, забезпечивши більшу точність і ефективність при роботі з недосконалими даними.

Задача моделювання в даному дослідженні полягає в тому, щоб створити таку систему, яка на основі нечіткої логіки дозволяє автоматизувати аналіз бізнес-правил, роблячи процес більш точним, зручним

і ефективним. Усі моделі та алгоритми, що будуть розроблені, повинні бути адаптовані до специфіки предметної області та вимог проекту. Це дозволить зменшити людський фактор, прискорити процес прийняття рішень і автоматизувати ключові етапи проектування бази даних.

Основною метою постановки задачі моделювання є створення математичної моделі для нечіткої системи, яка дозволить аналізувати бізнес-правила, що мають нечіткий, неповний або суперечливий характер. Це дозволить підвищити ефективність проектування бази даних та автоматизувати процеси, що потребують великих витрат часу і зусиль при використанні традиційних методів. Завдяки використанню нечіткої логіки можна зменшити вплив неточностей в даних і прийняти більш обґрунтовані рішення.

Обмеження моделі визначають, у яких умовах модель може не працювати або працювати не так ефективно:

Не всі види даних можуть бути адекватно представлені в нечіткій формі. Наприклад, для точних числових значень (наприклад, визначення конкретної ціни чи кількості товару) може бути доцільніше використовувати традиційні методи аналізу. У таких випадках нечітка логіка не дасть значного покращення.

Обмеження по часу та ресурсах. Моделювання може вимагати значних обчислювальних потужностей та часу для аналізу великих обсягів даних. Тому модель повинна бути оптимізована, щоб ефективно працювати з реальними обсягами даних.

Задача моделювання для нечіткої системи, що аналізує бізнес-правила, полягає у наступному:

– Опис параметрів бізнес-правил через нечіткі множини. Кожен параметр, що використовується в бізнес-правилах (наприклад, попит, ціна, кількість товару тощо), повинен бути описаний через нечіткі множини. Це дозволяє моделювати ситуації, де точне значення не можна отримати через невизначеність або неповноту даних. Наприклад, попит може бути представлений нечіткою множиною з елементами «низький», «середній», «високий», де кожен елемент має свою ступінь належності до множини.

– Створення нечітких правил на основі нечітких множин. На основі нечітких множин будуть створюватися нечіткі правила, які формулюють логіку прийняття рішень. Наприклад: «Якщо попит високий, то ціна має бути високою». Необхідно формалізувати ці правила так, щоб система могла автоматично приймати рішення на їх основі.

– Створення механізму дефузії. Оскільки результат аналізу бізнес-правил буде нечітким, необхідно створити механізм дефузії, який перетворює нечіткі значення на чіткі для подальшого використання в базі даних. Це може бути здійснено за допомогою методів центру ваги, максимізації тощо.

– Прийняття рішень на основі нечітких даних. Модель повинна бути здатною до прийняття рішень на основі нечітких даних, таких як визначення ціни або кількості товару в залежності від попиту та інших факторів. Це включає створення системи оцінки та вибору найбільш оптимальних рішень для конкретних умов.

Архітектура розробленої нечіткої системи для аналізу бізнес-правил побудована з урахуванням специфіки задачі та вимог до гнучкості, адаптивності та ефективності обробки даних. Система складається з кількох основних модулів, кожен з яких виконує чітко визначену функцію.

Основні компоненти архітектури:

Модуль введення даних:

– відповідає за прийом даних, що надходять від користувача або з БД;

– забезпечує обробку вхідних параметрів, таких як попит, ціна, доступність ресурсів;

– формалізує параметри у вигляді нечітких множин із визначенням функцій належності.

База знань. Містить усі нечіткі правила, які визначають логіку взаємозв'язків між параметрами.

Правила формуються у вигляді:

– «Якщо попит високий і ціна низька, то продажі великі.»

– «Якщо попит середній і ціна висока, то продажі середні.»

Забезпечує зберігання та динамічне оновлення правил відповідно до змін у бізнес-логіці.

Модуль обробки даних реалізує алгоритми нечіткої логіки для аналізу даних:

Фазифікація – перетворює чіткі вхідні дані на нечіткі множини.

Виведення рішень – обробляє нечіткі правила для отримання результату.

Дефазифікація – перетворює нечіткий результат у чітке значення для подальшого використання.

Модуль інтеграції з базою даних. Забезпечує зв'язок із системою управління базами даних (СУБД).

Зберігає результати аналізу, які використовуються для створення або оновлення структури бази даних.

Надає дані для візуалізації та подальшого аналізу.

Модуль прийняття рішень. Проводить аналіз результатів обробки для формування конкретних рекомендацій.

Приклад: на основі аналізу попиту та ціни рекомендує рівень запасів продукції.

Модуль управління системою. Дозволяє адмініструвати базу знань і налаштовувати параметри системи.

Забезпечує управління правами доступу користувачів.

Архітектура моделі побудована таким чином, щоб забезпечити ефективну взаємодію всіх компонентів:

Користувач або інша система вводить дані через модуль введення.

- Дані передаються в модуль обробки, де вони фазифікуються.
- База знань надає правила, що застосовуються до нечітких даних.
- Модуль обробки генерує нечіткий результат, який дефазифікується для отримання чіткої рекомендації.
- Результати передаються до бази даних через модуль інтеграції.

Основні переваги архітектури:

- легкість у додаванні нових функцій або зміні існуючих компонентів;
- здатність адаптуватися до нових умов і вимог бізнес-логіки;
- можливість розширення для обробки великих обсягів даних;
- зменшення людського фактору, скорочення часу на обробку даних.

Розроблена архітектура забезпечує ефективне вирішення задачі аналізу бізнес-правил з використанням нечіткої логіки, сприяючи підвищенню точності та швидкості прийняття рішень.

Розглянемо цю ж систему змодельовану у MatLab.

Система базується на нечіткій логіці та використовує вхідні дані для визначення ціни товару. Основні елементи:

1. Вхідні параметри:

Попит (Demand): характеризує рівень попиту на товар. Діапазон значень: [0, 100].

Мітки нечітких множин:

- Низький (Low)
- Середній (Medium)
- Високий (High)

Конкурентна ціна (CompetitorPrice): представляє ціну, встановлену конкурентами. Діапазон значень: [0, 100].

Мітки нечітких множин:

- Низька (Low)
- Середня (Medium)
- Висока (High)

2. Вихідний параметр:

Ціна товару (Price): визначається на основі вхідних параметрів. Діапазон значень: [0, 100].

Мітки нечітких множин:

- Низька (Low)
- Середня (Medium)
- Висока (High)

3. Правила нечіткої логіки:

Система містить дев'ять правил, які визначають вихідний параметр на основі комбінацій значень вхідних параметрів:

Наприклад:

- Якщо попит низький і конкурентна ціна низька, тоді ціна висока.
- Якщо попит середній і конкурентна ціна середня, тоді ціна середня.
- Якщо попит високий і конкурентна ціна висока, тоді ціна низька.

4. Тип функцій приналежності:

Для всіх змінних використовуються трикутні функції приналежності (trimf).

5. Процес роботи:

Вхідні значення задаються для двох параметрів, наприклад:

Попит = 60 (середній)

Конкурентна ціна = 40 (ближче до середнього).

Система застосовує нечіткі правила для визначення ступеня приналежності вхідних значень до заданих множин.

Обчислюється результат (ціна товару) шляхом нечіткого висновку (рис. 3.1-3.3).

Розроблена система визначення ціни товару на основі нечіткої логіки демонструє можливість врахування багатозначних вхідних параметрів, таких як попит і конкурентна ціна, для ухвалення рішення про встановлення оптимальної ціни.

Основні переваги:

– система дозволяє обробляти невизначеність і неточність у даних, що характерно для реальних ринкових умов;

– додавання нових правил або параметрів не потребує суттєвих змін у структурі;

– графічні результати допомагають зрозуміти вплив кожного з параметрів на кінцеве рішення.

Разом з тим, існують деякі аспекти для подальшого вдосконалення:

– Можна використати більш складні функції приналежності (наприклад, гаусові чи трапецієподібні), щоб краще відобразити реальні залежності.

– Оптимізація правил і меж змінних може бути здійснена на основі емпіричних даних.

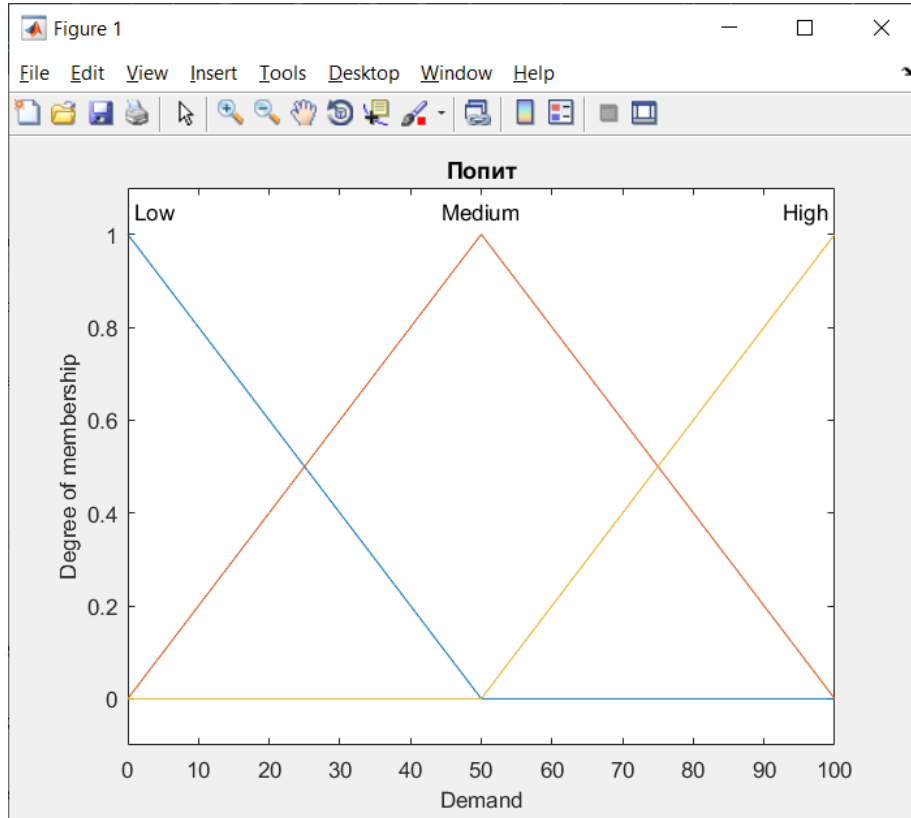


Рис. 1. Графік Попиту

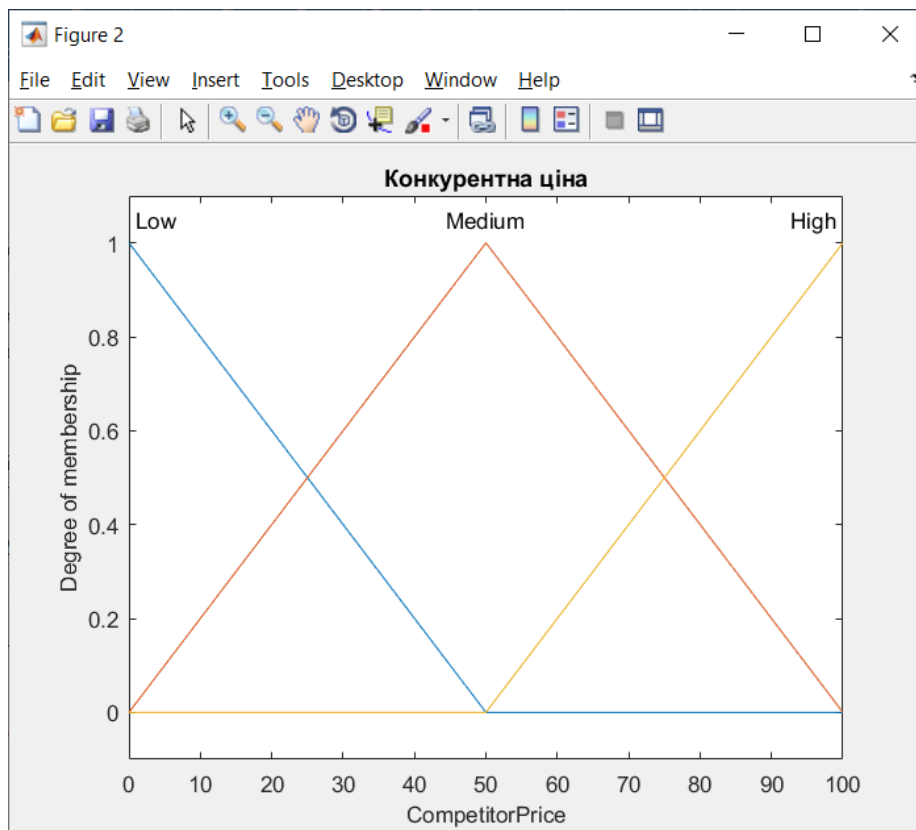


Рис. 2. Графік Конкурентної ціни

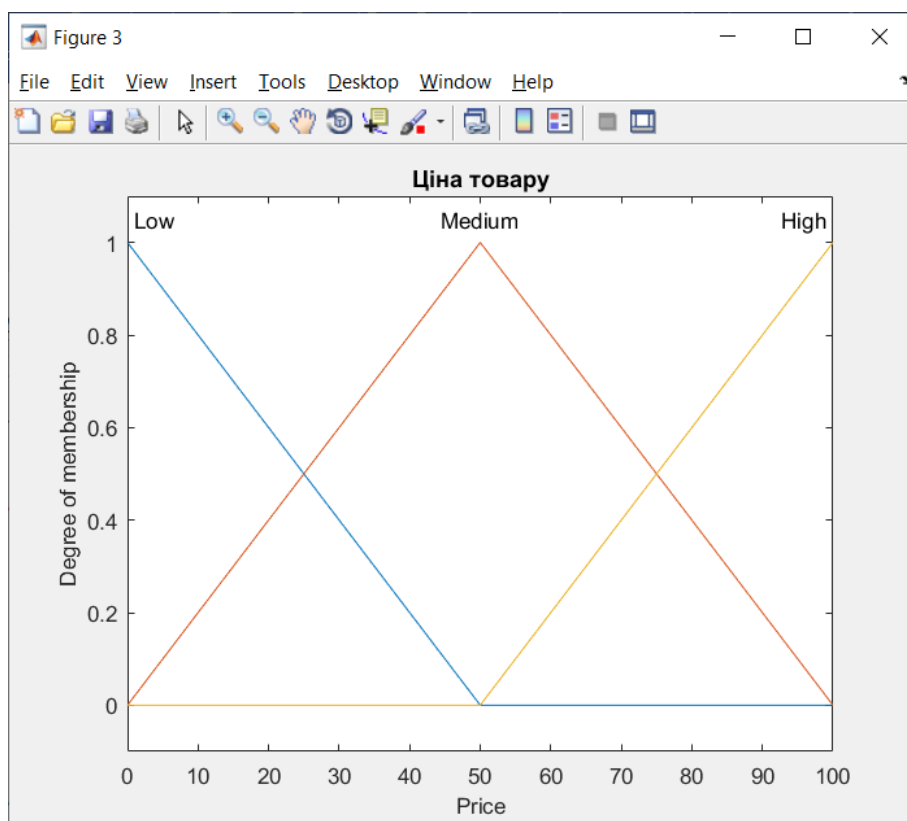


Рис. 3. Графік Ціни товару

Таким чином, розроблена модель є доброю основою для автоматизованого аналізу бізнес-правил і може бути інтегрована в систему ціноутворення в реальних комерційних умовах після усунення поточних технічних недоліків.

На етапі аналізу вимог проводиться вивчення потреб замовника та визначення технічних вимог до програмного продукту.

Принципові результати аналізу вимог:

- 1 Створення документації про функціональні та нефункціональні вимоги;
- 2 Складання плану роботи над проектом, визначення етапів і пріоритетів.

На етапі проектування розробляється архітектура програмного продукту та база даних, що буде використовуватися для зберігання та обробки даних.

Проектування бази даних:

- визначаються таблиці для зберігання даних, такі як `business_rules`, `fuzzy_sets`, `inputs`, `outputs`, `fuzzy_set_types` тощо. Кожна таблиця містить відповідні атрибути та зовнішні ключі для забезпечення зв'язків між даними;
- створюються зв'язки між таблицями, що дозволяє забезпечити цілісність даних. Наприклад, таблиця `fuzzy_sets` має зв'язок з таблицею `fuzzy_set_types` для ідентифікації типів множин;
- для забезпечення швидкості роботи з великою кількістю даних проектується індексація таблиць та оптимізація SQL-запитів;
- окрему увагу приділено зручності взаємодії користувача з системою. Це включає: створення графічного інтерфейсу для введення та виведення даних; використання діалогових вікон для надання інформації про помилки або успішні операції; побудова інтуїтивно зрозумілих форм для введення бізнес-даних та виведення результатів аналізу нечіткої логіки, механізм обробки винятків.

Використання графічного інтерфейсу для побудови графіків та аналізу нечіткої логіки дозволяє користувачам легко вводити дані та отримувати наочні результати аналізу. Можливість додавання та видалення бізнес-правил, а також перегляд результатів у зручному вигляді, робить програму гнучкою та зручною для користувачів.

Обробка отриманих результатів є критично важливим етапом у процесі використання нечіткої логіки для аналізу та прийняття рішень на основі зібраних даних. Цей етап передбачає кілька ключових процесів: інтерпретацію результатів, візуалізацію, перевірку на відповідність очікуванням та подальше використання цих результатів для прийняття обґрунтованих рішень. Інтерпретація результатів здійснюється на основі аналізу нечітких множин, отриманих за допомогою алгоритмів нечіткої логіки. Для кожної множини нечіткої логіки визначаються вхідні параметри, що передаються в систему, а також розраховується ступінь належності елементів до тієї чи іншої категорії в рамках заданих бізнес-правил.

Form1

Бізнес правило:

Умова:

Результат:

Назва множини:

Тип множини:

Параметри:

rule_id	rule_description	condition	result
13	Premium quality	quality > 9	Buy
14	Unreasonable price	price > 300	Avoid
15	Special offer	price < 50 AND discou...	Buy
21	Unreasonable price1	price < 200	Buy
*			

Рис. 4. Інтерфейс додатку для роботи з бізнес-правилами

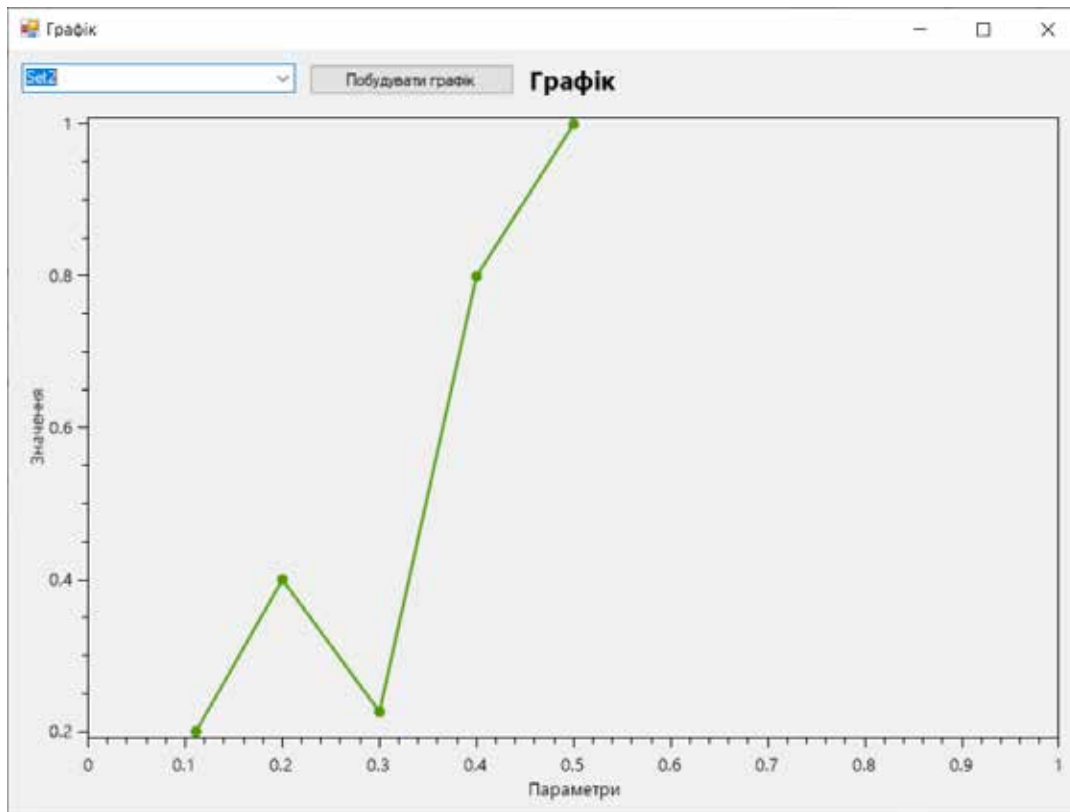


Рис. 5. Параметри системи

В результаті цих обчислень отримуються значення, які можуть бути представлені у вигляді графічних результатів або конкретних числових показників, що вказують на відповідність заданим критеріям чи параметрам.

Аналіз результатів здійснюється на основі порівняння отриманих значень з заздалегідь визначеними межами та бізнес-правилами. Це дозволяє виявити аномалії або відхилення від очікуваних значень, а також визначити, наскільки ефективно працює система для кожної конкретної ситуації.

Зокрема, для кожної отриманої результатної множини здійснюється перевірка її валідності та точності. Це може включати:

- 1 оцінку ступеня належності елементів до заданої категорії;
- 2 визначення найбільш значущих факторів, що впливають на результат;
- 3 порівняння отриманих результатів з попередніми чи контрольними даними для виявлення змін чи трендів.

Одним з важливих аспектів обробки результатів є їх візуалізація, що дозволяє користувачу зрозуміти інформацію та зробити відповідні висновки на основі графічного відображення даних. В розробленому програмному продукті візуалізація здійснюється через побудову графіків, які показують різні аспекти результатів нечіткої логіки, зокрема: графіки функцій належності; графіки, що демонструють вплив різних параметрів на кінцевий результат; візуалізація розподілу значень по типах множин та їх частотах.

Ці графіки допомагають користувачам краще зрозуміти, як працює система і яким чином параметри впливають на результати.

Після отримання результатів і їх візуалізації важливо здійснити перевірку їх відповідності заданим бізнес-правилам. На цьому етапі порівнюються результати обробки нечіткої логіки з критеріями, визначеними замовником чи аналітиками. Це дозволяє оцінити точність і адекватність результатів для конкретної предметної області.

Остаточні результати обробки нечіткої логіки можуть бути використані для прийняття рішень у різних бізнес-процесах. Вони допомагають користувачам ефективно управляти ресурсами, прогнозувати майбутні тенденції, а також оперативно реагувати на зміни у зовнішньому середовищі. В залежності від бізнес-правил, система може надавати користувачам конкретні рекомендації або варіанти рішень на основі отриманих результатів.

Отримані результати можуть бути збережені в базі даних для подальшого аналізу або звітності. Це дозволяє відслідковувати зміни у часі, оцінювати ефективність різних стратегій або оцінювати результативність системи в умовах реального використання.

Обробка результатів є невід'ємною частиною аналізу та застосування нечіткої логіки в реальних умовах. Вона включає не тільки обчислення та візуалізацію результатів, але й глибоке розуміння їх значення для бізнесу. Якісна обробка результатів дозволяє не лише точніше передбачати тенденції, а й робити обґрунтовані висновки та приймати стратегічні рішення, що сприяють підвищенню ефективності діяльності організацій.

Висновки. У результаті роботи було виконано реалізацію основних компонентів розробленої нечіткої системи для аналізу бізнес-правил при проектуванні баз даних. Інтерфейсна частина системи була розроблена з орієнтацією на зручність використання, що дозволяє користувачам ефективно вводити дані, формулювати бізнес-правила та отримувати результати аналізу.

Алгоритми взаємодії з користувачем, що були реалізовані в рамках цього розділу, забезпечили зручний процес збору та обробки інформації. Окремо було проаналізовано отримані результати, що дозволило провести їхню верифікацію та порівняння з реальними даними, забезпечивши точність і ефективність системи.

Реалізація цих компонентів не тільки підтвердила працездатність системи, але й показала її значний потенціал для використання в реальних умовах. Зокрема, система продемонструвала високу адаптивність до змінних умов бізнес-процесів і здатність ефективно обробляти нечіткі та неповні дані.

Список використаних джерел:

1. Згуровский М. З. Модели і методи прийняття рішень за нечітких умов. К.: НВП «Видавництво «Наукова думка» НАН України», 2011. 279 с.
2. Матвійчук А. В. Штучний інтелект в економіці: нейронні мережі, нечітка логіка: Монографія. К.: КНЕУ, 2011. 439 с.
3. Матвійчук А. В. Моделювання фінансової стійкості підприємств із застосуванням теорій нечіткої логіки, нейронних мереж і дискримінантного аналізу. *Вісник НАН України*. № 9. К, 2010. С. 24-46.
4. Недосекин О. О. Фондовый менеджмент у розпливчастих умовах. Типографія «Сезам», 2003. 201 с.
5. Чернов В. Г. Модели підтримки прийняття рішень у інвестиційній діяльності на основі апарата нечітких множин. Телеком, 2007. 312 с.
6. Волошин О. Ф. Моделювання конкурентоспроможності об'єктів економічної діяльності за допомогою нечітких множин. *Вісник НУ «Львівська політехніка»*. № 690. 2010. С. 534-539.
7. Литвин Б. М. Фінансовий аналіз: Навч. посібник. К.: «Хай-Тек Прес», 2008. 336 с.
8. Маляр М. М. Модель оцінки кредитоспроможності підприємства в умовах невизначеності. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. № 1/4(55). Харків, 2012. С. 51-57.

-
9. Міхевич В. С., Волкович В. Л. Числові методи дослідження та проектування складних систем. М.: Наука, 1982. 286 с.
 10. Постанова НБУ “Положення про порядок формування та використання резерву для відшкодування можливих втрат за кредитними операціями банків” від 06.07.2000 року, № 279.
 11. Ротштейн О. П. Інтелектуальні технології ідентифікації: нечіткі множини, генетичні алгоритми, нейронні мережі. Вінниця: «Універсум-Вінниця», 1999. 320 с.
 12. Шило В. П. Аналіз фінансового стану виробничої та комерційної діяльності підприємства: Навч. посібник. К.: Кондор, 2005. 240 с.
 13. Zadeh L. Fuzzy Sets. *Information and Control*. № 81965. P. 338–353.
 14. Adlassnig, K. P., Fuzzy Systems In Medicine. *EUSFLAT_2001*, pp. 11-15.
 15. Aruna P., Puviarasan N., Palaniappan B. An Investigation of Neuro-Fuzzy System in Psychosomatic Disorders. *Expert Systems with Applications*. 2005. Vol. 28. pp. 673–679.
 16. Liao S. H. Expert System Methodologies And Applications: A Decade Review From 1995-2004. *Expert Systems with Applications*. Vol. 28. 2005. pp. 93–103.
 - Kuncheva L. I., Steimann F. Editorial – Fuzzy Diagnosis. *Artificial Intelligence in Medicine*. Vol. 16. 1999. pp. 121–128.
 17. Abbod M. F., Keyserlingk D. G., Linkens D. A., Mahfouf M. Survey of Utilization of Fuzzy Technology in Medicine and Healthcare. *Fuzzy Sets and Systems*. Vol. 120. 2001. pp. 331–349.
 18. Mahfouf M. Intelligent Systems Modelling and Decision Support in Bioengineering (Chapter 2). *ISM*. 2006. 342 p.
 19. Phuong, N. H., Kreinovich, V., Fuzzy Logic & its Applications in Medicine. *Vladi-2000*, pp 34-56.
 20. Smith, D.E. 1992. Expert Systems for Medical Diagnosis: A Study in Technology Transfer. *Technology Transfer fall*, pp. 45-53.
 21. Mahfouf M., Abbod M. F., Linkens D. A. A Survey of Fuzzy Logic Monitoring and Control Utilization in Medicine. *Artificial Intelligence in Medicine*. 2001. Vol. 21. pp. 27–42.
 22. Horvitz E. Problem-Solving Design: Reasoning About Computational Value, Tradeoffs and Resources. *Proceedings of the NASA Research Forum*. 1987. pp. 26–43. Mountain View, CA.
 23. Anjaneyulu K. S. R. Expert Systems: An Introduction. *Resonance*. 1998. pp. 46–58.
 24. Adlassnig K. P., Kolarz G., Scheithauer W. Present State of the Medical Expert System CADIAG-2. *Methods of Information in Medicine*. 1985. Vol. 24. pp. 13–20.
 25. Linkens, D.A., Abbod, M.F., Mahfouf, M., An Initial Survey of Fuzzy Logic in Monitoring And Control Utilization in Medicine. *Citeseerx.ist*. Vol 1, pp. 234-245.
 26. Winkel, P. The Application of Expert Systems in the Clinical Laboratory. *Clinical Chemistry*, 35 1989, 8: pp. 1595-1600.
 27. Candel A. Fuzzy Expert Systems. CRC Press. 1991. (Chapter 1). 512 p.
 28. Engle R. L., Flehinger B. J. Why Expert Systems for Medical Diagnosis Are Not Being Generally Used: A Valedictory Opinion. *Bulletin of the New York Academy of Medicine*. 1987. Vol. 63, No. 2. pp. 193–198.
 29. Ali Z., Singh V. Potentials of Fuzzy Logic: An Approach to Handle Imprecise Data. *American Medical Informatics Association*. 2010. Vol. 2, No. 4. pp. 358–361.
 30. Ameri, A., Moshtaghi H. Design and Development of an Expert System in Differential Diagnosis of Maxillofacial Radio-lucent Lesions. *Mdh*. Vol 2. pp. 456-468.
 31. Harris, G. Capacity Building and Local Empowerment. *Expert Systems*. Vol 1, 2006. pp. 654-673.
 32. Pereira J. C. R., Tonelli P. A., Barros L. C., Ortega N. R. S. Defuzzification in Medical Diagnosis. *Advances in Logic, Artificial Intelligence & Robotics*. 2002. pp. 202–207.
 33. Ahmad M. R., Mahdi A. A., Salih A. A. Designing a Disease Diagnosis System by Using Fuzzy Set Theory. *Proceedings of 5th Asian Mathematical Conference*. 2009. pp. 256–260.
 34. Schumann A. Unconventional Probabilities and Fuzziness in CADIAG’s Computer Assisted Medical Expert Systems. *Studies in Logic, Grammar & Rhetoric*. Vol. 22, No. 35. 2010. pp. 113–124.
 35. Черняк О. І., Захарченко П. В. Інтелектуальний аналіз даних: підручник. Київ, 2014. 559 с.
 36. Сергеева В. В. Застосування методів нечіткої логіки з метою виявлення нестабільної фінансово-економічної ситуації міста. *Ефективна економіка*. № 5. 2014. с. 23-34.
 37. Антоненко В. М. Сучасні інформаційні системи і технології: управління знаннями : навчальний посібник. Ірпінь : Національний університет ДПС України, 2016. 212 с.

References:

1. Zghurovskiy M.Z. (2011) Modeli i metody pryiniattia rishen za nechitkykh umov. *Vydavnytstvo «Naukova dumka» NAN Ukrainy*, 279 p.
2. Matviichuk A. V. (2011) Shtuchnyi intelekt v ekonomitsi: neironni merezhi, nechitka lohika. *Monohrafiia*, 439 p.
3. Matviichuk A. V. (2010) Modeliuvannya finansovoi stikosti pidpriemstv iz zastosuvanniam teorii nechitkoi lohiky, neironnykh merezh i dyskryminantnoho analizu. *Visn*, no 9. pp. 24-46.

-
4. Nedosekyn O. O. (2003) Fondovyi menedzhment u rozplyvchastykh umovakh. *Typohrafiia «Sezam»*, 201 p.
 5. Chernov V.H. (2007) Modeli pidtrymky pryiniattia rishen u investytsiinii diialnosti na osnovi aparata nechitkykh mnozhyn. *Telekom*, 312 p.
 6. Voloshyn O.F. (2011) Modeliuvannia konkurentospromozhnosti obektiv ekonomichnoi diialnosti za dopomohoiu nechitkykh mnozhyn. *Visnyk NU «Lvivska politekhnika»*, no 690, pp. 534-539.
 7. Lytvyn B.M. (2008) Finansovyi analiz. *Khai-Tek Pres.* 336 p.
 8. Maliar M.M. (2012) Model otsinky kredytopromozhnosti pidpriumstva v umovakh nevyznachenosti. *Skhidno-Yevropeiskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii*, no 1/4(55), pp. 51-57.
 9. Mikhevych V.S., Volkovych V.L. (1982) Vychysni metody doslidzhennia ta proiektuvannia skladnykh system. *Nauka.* 286 p.
 10. Polozhennia pro poriadok formuvannia ta vykorystannia rezervu dlia vidshkoduvannia mozhyvykh vtrat za kredytnymy operatsiiamy bankiv. *Postanova NBU*, no 279.
 11. Rotshtein O.P. (1999) Intelktualni tekhnolohii identyfikatsii: nechitki mnozhyny, henetychni alhorytmy, neironni merezhi. *UNIVERSUM-Vinnytsia.* 320 p.
 12. Shylo V.P. (2005) Analiz finansovoho stanu vyrobnychoi ta komertsiiinoi diialnosti pidpriumstva. *Kondor.* 240 p.
 13. Zadeh L. Fuzzy Sets / L. Zadeh (1965) *Information and Control*, no 8, pp. 338–353.
 14. Adlassnig, K.P., Fuzzy Systems In Medicine. *EUSFLAT_2001*, pp. 11-15.
 15. Aruna P., Puviarasan N., Palaniappan B. (2005) An Investigation of Neuro-Fuzzy System in Psychosomatic Disorders. *Expert Systems with Applications.* Vol. 28, pp. 673–679.
 16. Liao S. H. (2005) Expert System Methodologies And Applications: A Decade Review From. *Expert Systems with Applications.* Vol. 28, pp. 93–103.
 17. Kuncheva L. I., Steimann F. (1999) Editorial – Fuzzy Diagnosis. *Artificial Intelligence in Medicine.* Vol. 16, pp. 121–128.
 18. Abbod M. F., Keyserlingk D. G., Linkens D. A., Mahfouf M. (2001) Survey of Utilization of Fuzzy Technology in Medicine and Healthcare. *Fuzzy Sets and Systems.* Vol. 120, pp. 331–349.
 19. Mahfouf M. (2006) Intelligent Systems Modelling and Decision Support in Bioengineering. *ISM.* 342 p.
 20. Phuong, N.H., Kreinovich, V. (2000) Fuzzy Logic & its Applications in Medicine. *Vladi-2000*, pp 34-56.
 21. Smith, D.E. (1992) Expert Systems for Medical Diagnosis: A Study in Technology Transfer. *Technology Transfer*, no 17, pp. 45-53.
 22. Mahfouf M., Abbod M. F., Linkens D. A. (2001) A Survey of Fuzzy Logic Monitoring and Control Utilization in Medicine. *Artificial Intelligence in Medicine.* Vol. 21, pp. 27–42.
 23. Horvitz E. (1987) Problem-Solving Design: Reasoning About Computational Value. *Tradeoffs and Resources. Proceedings of the NASA Research Forum.* pp. 26–43.
 24. Anjaneyulu K. S. R. (1998) Expert Systems: An Introduction. *Resonance*, pp. 46–58.
 25. Adlassnig K. P., Kolarz G., Scheithauer W. (1985) Present State of the Medical Expert System CADIAG-2. *Methods of Information in Medicine.* Vol. 24, pp. 13–20.
 26. Linkens, D.A., Abbod, M.F., Mahfouf, M. (2000) An Initial Survey of Fuzzy Logic in Monitoring And Control Utilization in Medicine. *Citeseerx.ist.* Vol 1, pp 234-245.
 27. Winkel, P. (2000) The Application of Expert Systems in the Clinical Laboratory. *Clinical Chemistry*, no 35, pp. 1595-1600.
 28. Candel A. (1991) Fuzzy Expert Systems. *CRC Press.* 512 p.
 29. Engle R. L., Flehinger B. J. (1987) Why Expert Systems for Medical Diagnosis Are Not Being Generally Used: A Valedictory Opinion. *Bulletin of the New York Academy of Medicine.* Vol. 63, no. 2, pp. 193–198.
 30. Ali Z., Singh V. (2010) Potentials of Fuzzy Logic: An Approach to Handle Imprecise Data. *American Medical Informatics Association.* Vol. 2, no. 4., pp. 358–361.
 31. Ameri, A., Moshtaghi H. (2000) Design and Development of an Expert System in Differential Diagnosis of Maxillofacial Radio-lucent Lesions. *Mdh.* Vol 2. pp. 456-468.
 32. Harris, G. (2006) Capacity Building and Local Empowerment. *Expert Systems.* Vol 1, pp. 654-673.
 33. Pereira J. C. R., Tonelli P. A., Barros L. C., Ortega N. R. S. (2006) Defuzzification in Medical Diagnosis. *Advances in Logic, Artificial Intelligence & Robotics.* pp. 202–207.
 34. Ahmad M. R., Mahdi A. A., Salih A. A. (2009) Designing a Disease Diagnosis System by Using Fuzzy Set Theory. *Proceedings of 5th Asian Mathematical Conference*, pp. 256–260.
 35. Schumann A. (2010) Unconventional Probabilities and Fuzziness in CADIAG's Computer Assisted Medical Expert Systems. *Studies in Logic, Grammar & Rhetoric.* Vol. 22, No. 35. pp. 113–124.
 36. Cherniak O. I., Zakharchenko P. V. (2014) Intelktualnyi analiz danykh. *Kyiv*, 559 p.
 37. Sierhieieva V. V. (2014) Zastosuvannia metodiv nechitkoi lohiky z metoiu vyavlennia nestabilnoi finansovo-ekonomichnoi sytuatsii mista. *Efektivna ekonomika*, no 5. Pp. 23-34.
 38. Antonenko V. M. (2016) Suchasni informatsiini systemy i tekhnolohii: upravlinnia znanniamy. *Natsionalnyi universytet DPS Ukrainy.* 212 p.
-

КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 004.72

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.7>

Киричек Г. Г., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж
Національного університету "Запорізька політехніка"
ORCID: 0000-0002-0405-7122

Пестов О. Д., студент факультету комп'ютерних наук
та технологій
Національного університету "Запорізька політехніка"
ORCID: 0009-0002-6092-3301

Тягунова М. Ю., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж
Національного університету "Запорізька політехніка"
ORCID: 0000-0002-9166-5897

СИСТЕМА ВІДДАЛЕНОГО КЕРУВАННЯ ОБ'ЄКТАМИ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

Стаття присвячена актуальному питанню забезпечення віддаленого керування об'єктами критичної інфраструктури в умовах активних бойових дій, коли вони постійно піддаються ракетним ударам та атакам. Авторами визначено основне завдання із підтримки працездатності віддаленого об'єкту, виключаючи ризики для персоналу, який цей об'єкт обслуговує та наведено етапи реалізації та впровадження системи, не виключаючи виникнення аварійних відключень електрики та інших надзвичайних ситуацій. В роботі розглянуто процес організації віддаленого керування автоматизованими об'єктами застосовуючи накладену P2P мережу Yggdrasil, а також моделі, методи і програмні засоби забезпечення віддаленого керування об'єктами. Враховано, що при застосуванні технології Yggdrasil, кожен вузол мережі звертається до іншого за його внутрішньою мережевою IPv6-адресою, а трафік між ними проходить через інші вузли поки не досягне адресата. Маршрутизація пакетів відбувається на основі координат дерева мережі, розподіленої за допомогою хеш-таблиць (DHT) та таблиць маршрутизації на кожному вузлі. У статті проаналізовано наявні готові рішення віддаленого керування, виявлено їх недоліки та запропоновано алгоритм реалізації віддаленого керування із використанням мережі Yggdrasil. З'ясовано, що в системі є доцільним: використання мобільних телефонів із підтримкою протоколу RNDIS; застосування мереж мобільних операторів зв'язку та спеціального програмного забезпечення на боці клієнта. Авторами, з метою спрощення встановлення і налаштування клієнта Yggdrasil на кінцевих пристроях під управлінням операційних систем Windows, на мові програмування C реалізовано конфігураційну утиліту YggVPN. Запропонований в статті варіант системи віддаленого керування впроваджено і перевірено із використанням клієнтського/серверного програмного забезпечення TigerVNC, яке застосовується на робочих місцях персоналу, та додатку droidVNC-NG, що використовується для віддаленого керування телефонами. Мережеві інструменти Yggdrasil і паролний захист серверів VNC забезпечують конфіденційність зв'язку і запобігають несанкціонованому доступу до об'єкта. Зв'язок з об'єктом здійснюється через Інтернет, завдяки чому забезпечується мобільність віддалених операторів і робочих місць.

Ключові слова: мережа, система, клієнт, протокол, телефон, керування.

Kyrychek H. H., Pestov O. D., Tiahunova M. Yu. Remote control system of critical infrastructure objects

The article is devoted to the topical issue of providing remote control of critical infrastructure facilities in conditions of active hostilities when they are constantly exposed to missile strikes and attacks. The authors define the main task of maintaining the functionality of a remote object, excluding risks for the personnel that this object serves, and the stages of implementation and implementation of the system are given, not excluding the occurrence of emergency power outages and other emergencies. The paper considers the process of organizing remote control of automated objects using the Yggdrasil P2P network, as well as models, methods, and software for providing remote control of objects. It is taken into account that when applying Yggdrasil technology, each network node addresses another by its internal network IPv6 address, and the traffic between them passes through other nodes until it reaches the destination. Packet routing is based on the coordinates of the network tree distributed

© Г. Г. Киричек, О. Д. Пестов, М. Ю. Тягунова, 2024

using hash tables (DHT) and routing tables at each node The article analyzes available ready-made remote control solutions, identifies their shortcomings, and proposes an algorithm for implementing remote control using the Yggdrasil network. It has been found that the following is appropriate in the system: the use of mobile phones with support for the RNDIS protocol; application of networks of mobile communication operators and special software on the client side. The authors, to simplify the installation and configuration of the Yggdrasil client on end devices running Windows operating systems, implemented the YggVPN configuration utility in the C programming language. The version of the remote control system proposed in the article is implemented and tested using the client/server software TigerVNC, which is used at staff workplaces, and the droidVNC-NG application, which is used for remote control of phones. Yggdrasil network tools and password protection of VNC servers ensure communication confidentiality and prevent unauthorized access to the object. Communication with the object is carried out via the Internet, thereby ensuring the mobility of remote operators and workplaces.

Key words: network, system, client, protocol, telephone, control.

Постановка проблеми. Задача підтримки працездатності віддаленого об'єкту із мінімальними ризиками для персоналу, який його обслуговує, є актуальною у сучасних реаліях і умовах проведення активних бойових дій, коли об'єкти критичної інфраструктури піддаються ракетним ударам та атакам [1]. При цьому це є системи, або частини цих систем чи їх сукупність, які є надзвичайно важливими для економіки, національної безпеки і оборони, тому порушення їх функціонування завдає проблем національним інтересам [2]. До таких об'єктів зазвичай відносять електричні (атомні) станції та підстанції, аеродроми, залізничні вузли, військові об'єкти, медичні заклади, тощо [1, 2].

Спираючись на це, потрібно відрізнити між собою засоби віддаленого доступу і віддаленого керування. Під віддаленим доступом до об'єкту розуміємо лише організацію зв'язку між ним та віддаленим робочим місцем, тоді як віддалене керування є процесом спостереження та безпосереднього впливу оператора на віддалений об'єкт за допомогою спеціальних програмних та апаратних засобів [3]. Найчастіше для здійснення віддаленого керування об'єктом необхідно мати, як мінімум, віддалений доступ до нього. Тому логічно припустити, що віддалене керування застосовується лише для автоматизованих систем. Автоматизованим (комп'ютеризованим) об'єктом інфраструктури вважаємо об'єкт, робота якого відбувається за допомогою пристрою під управлінням операційної системи із спеціальним програмним забезпеченням [4]. Подібні автоматизовані робочі місця персоналу, зазвичай, є товстими або тонкими клієнтами.

Товстими клієнтами у цьому випадку є пристрої, до яких безпосередньо підключаються усі підсистеми, які потрібно контролювати [4]. Програмне забезпечення, для кожної конкретної системи, є специфічним і тому немає можливості встановлювати якесь стороннє програмне забезпечення [5]. Це, зазвичай, ускладнює задачу віддаленого керування та примушує використовувати зовнішні апаратні засоби, наприклад такі, як KVM-over-IP комутатори. Тонкі ж клієнти, за допомогою мережевих з'єднань, лише надають об'єкту доступ до сервера, який і контролює підключені до нього підсистеми [3]. Сам доступ, при цьому, здійснюється засобами мережевого програмного забезпечення, яке, відповідно, встановлюється на клієнті та сервері. Тому не важливо, яким є це програмне забезпечення, оскільки запуск процесу віддаленого керування об'єктом спирається на просте встановлення цього ж програмного забезпечення на віддалене робоче місце та організації зв'язку між клієнтом та сервером [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Поводячи аналіз готових програмних рішень, які на даний час можуть забезпечувати як віддалений доступ так і віддалене керування об'єктами інфраструктури, можемо приділити особливу увагу наступним, що найбільш часто застосовуються для вирішення подібних завдань: AnyDesk, Team Viewer, RealVNC VNC Connect та GoToMyPC [6, 7]. Усі ці програмні рішення прості у налаштуванні і часто вимагають тільки доступу до відкритої (глобальної) мережі, але їм характерні ряд недоліків, це: централізованість; закритість вихідного коду; не мають безкоштовних версій для комерційного використання та/або обмеження безкоштовної версії [3].

При цьому централізованість означає, що при використанні одного з таких рішень доводиться стикатися з певними умовами та обмеженнями конкретної компанії та застосовувати тільки її серверне програмне забезпечення, що, зазвичай може стати єдиною точкою відмови. Також закритий вихідний код, в свою чергу, практично унеможливує відчуття підтримки конфіденційності зв'язку з об'єктом та відсутності втручання сторонніх осіб, що ставить під сумнів безпеку самого об'єкту [7].

В якості альтернативи розглянемо систему MeshCentral, яка є повноцінним, функціонально незалежним рішенням віддаленого керування, що використовує відкритий вихідний код для серверної і клієнтської частин системи [6]. Також вона є безкоштовною і дозволяє розгортати серверну частину на власному пристрої, до якого підключаються керовані об'єкти та віддалені робочі місця. При цьому керування підконтрольним об'єктом здійснюється з використанням вебінтерфейсу серверної частини, або за допомогою утиліт, а зв'язок між ними підтримується утилітою MeshRouter, шляхом перенаправлення портів. Увесь трафік є зашифрованим за замовчанням. Кінцеві користувачі реєструються адміністратором, автентифікація здійснюється за логіном та паролем із можливістю застосування при підключенні додаткової двофакторної автентифікації та апаратних ключів [6]. Використання MeshCentral вирішує проблеми, пов'язані із використанням закритого вихідного коду але потребує, для розгортання системи, застосування або власного серверу

з відкритою IP-адресою, або оренди віртуального приватного сервера (VPS), що зазвичай потребує фінансових витрат. До того ж проблема централізованості залишається, бо сервер є єдиною точкою відмови системи. При цьому ситуація погіршується, якщо сервер розміщено на території країни і він знаходиться в зоні виникнення постійних аварійних ситуацій [3].

Оскільки існуючі готові рішення потребують значних фінансових вкладень або є недостатньо надійними, процес організації віддаленого керування розбиваємо на менші за об'ємом задачі керування та організації доступу до об'єкту. При цьому вирішення задачі керування віддаленим об'єктом залежить від структури керованої системи (рис. 1).



Рис. 1. Віддалене керування

Якщо, як основа системи, застосовується тонкий клієнт то в системі, скоріш за все, вже використовується потрібний протокол віддаленого керування, один з: SSH, VNC, RDP, NX або інший спеціальний протокол обміну даними з сервером. Тому залишається тільки вирішити задачу доступу та установити спеціальне програмне забезпечення тонкого клієнта на віддалене робоче місце [8].

Якщо розглядати можливість використання стороннього програмного забезпечення при застосуванні товстого клієнта, то процес керування забезпечується встановленням відповідного серверного додатку із підтримкою одного з спеціальних протоколів, наприклад, TigerVNC, який є функціонально незалежним VNC-сервером та клієнтом, що підтримує відкритий вихідний код і забезпечує контроль над робочим столом сервера [7]. Якщо товстий клієнт не надає можливість встановлювати стороннє програмне забезпечення, то єдиним рішенням є встановлення та застосування зовнішнього пристрою, наприклад, комутатора KVM-over-IP, який емулює пристрій вводу/виводу і, водночас, є сервером, який підтримує спеціальні протоколи для віддаленого керування об'єктом [9]. Тому, в даному випадку, основним завданням є організація доступу віддаленого робочого місця до сервера [10].

Щоб забезпечити мобільність для операторів, які керують віддаленими об'єктами, потрібно забезпечити їм доступ до об'єкту інфраструктури через відкриту мережу, але реалізація такого доступу є достатньо складною і відповідальною. Навіть, якщо у об'єкта вже є вихід у глобальну мережу, скоріше за все, він знаходиться за пристроєм відповідного провайдерів, який використовує технологію NAT. Тому, пристрій з приватними локальними адресами створюють вихідні з'єднання з кінцевими пристроями у глобальній мережі, але зворотні з'єднання підтримувати не можуть, бо пристрій за NAT не має унікальної відкритої адреси для встановлення зворотного зв'язку. Це можна вирішити застосуванням статичної відкритої IP-адреси, але ця послуга, у більшості провайдерів потребує сплати. Крім цього, для обходу NAT можна застосувати власний виділений VPN-сервер, хоча він також вимагає відкритої IP-адреси або VPS-хостингу і найчастіше має проблему централізованості [3].

Альтернативою VPN-серверу вважаємо P2P-мережу Yggdrasil, яка працює поверх протоколу IP. У випадку застосування технології Yggdrasil, кожен вузол мережі звертається до іншого за його внутрішньою мережевою IPv6-адресою, а трафік між ними проходить через інші вузли поки не досягне адресата [11]. Цій мережі властиві самоконфігурація та децентралізованість бо адреса, кожним вузлом, формується як частина хеш-суми відкритого ключа, яка випадково згенерована асиметричною парою ключів [5]. Маршрутизація пакетів відбувається на основі координат дерева мережі, розподіленої за допомогою хеш-таблиць (DHT) та таблиць маршрутизації на кожному вузлі. Перед відправленням увесь трафік мережі шифрується відправником і може бути розшифрований лише отримувачем, що і гарантує постійну підтримку конфіденційності зв'язку [8].

Вузли однієї локальної мережі знаходять один одного автоматично, використовуючи multicast-розсилку. Вузли, які розташовані за пристроєм, який підтримує NAT, підключаються до мережі через один або декілька публічних вузлів, тому з точки зору самого NAT, подібне з'єднання завжди є вихідним [12]. Саме ця перевага технології Yggdrasil використовується для того щоб обійти NAT обмеження та встановити зв'язок

з віддаленим об'єктом. При цьому зв'язок працює стабільно поки хоча б один публічний вузол є доступним. Все це підвищує надійність подібної системи порівняно з централізованими рішеннями. Клієнт Yggdrasil також є функціонально незалежним та має відкритий вихідний код [9]. Але окрім переваг така мережа може мати і недоліки до яких відносять незручність використання довгих IPv6-адрес та відсутність вбудованого фаєрволу, що обмежує доступу до кінцевого об'єкту. Проблему довжини адрес можна вирішити різними методами [5], або компенсувати використанням файлу hosts, який підтримується операційними системами і дозволяє поставити у відповідність логічним адресам зручні символічні імена. А для фільтрації трафіку можна застосовувати сторонні засоби, наприклад фаєрвол iptables в системах Linux або політики безпеки IPsec в системах Windows [4]. До того ж, оскільки адреси формуються криптографічно, у якості одного з кроків організації безпеки, разом з паролем захистом можна використовувати фільтрацію трафіку за адресою джерела. Але при наявності лише одного каналу зв'язку це стає єдиною точкою відмови, погіршуючи надійність всієї системи. Тому, для зберігання постійного доступу, необхідно мати резервні шляхи у відкриту мережу. Такі з'єднання надають мережі мобільних операторів зв'язку, підключення до яких можна організувати за допомогою локальних робочих місць віддаленого об'єкту, до яких підключаються або USB-модеми або звичайні мобільні телефони із підтримкою протоколу RNDIS, який дозволяє пристрою емулювати мережевий інтерфейс Ethernet поверх інтерфейсу USB [13].

Постановка завдання. Метою дослідження є реалізація та впровадження системи, яка призначена для віддаленого керування об'єктами критичної інфраструктури, враховуючи умови проведення активних бойових дій не виключаючи виникнення аварійних відключень електрики та інших надзвичайних ситуацій. Об'єктом дослідження є процес організації віддаленого керування автоматизованими об'єктами застосовуючи накладену P2P мережу Yggdrasil. Предметом дослідження є моделі, методи і програмні засоби забезпечення віддаленого керування об'єктами. В роботі потрібно проаналізувати готові рішення, які на даний час використовуються для віддаленого керування, визначити їх недоліки та запропонувати алгоритми та способи реалізації системи віддаленого керування із використанням сучасних методів та технологій. При цьому в системі планується використання мобільних засобів зв'язку з підтримкою потрібних протоколів, застосування мереж мобільних операторів та спеціального програмного забезпечення на боці клієнта. З метою спрощення процесів установа та налаштування клієнтів на кінцевих пристроях планується, використовуючи мову програмування C, реалізувати утиліту конфігурації. Процеси роботи системи віддаленого керування потрібно протестувати із використанням клієнтського/серверного програмного забезпечення, яке потребує застосування на робочих місцях обслуговуючого персоналу та додатку, який планується застосовувати в процесі віддаленого керування телефонами.

Виклад основного матеріалу. Структуру наявної системи об'єкту наведено в першій частині рисунку 2. Керування підсистемами об'єкту здійснюється кінцевим пристроєм PC0 з робочих місць PC1, PC2 та PC3, які, у даному випадку є тонкими клієнтами при керуванні об'єктом PC0. В системі використовується KVM-over-IP комутатор, який підключено до об'єкту PC0 інтерфейсом VGA з метою отримання зображення та портом USB для емуляції миші і клавіатури. KVM-over-IP комутатор та робочі місця PC з першого по третій з'єднані у мережу за технологією FastEthernet інтерфейсу комутатора S1. Оскільки мережа, в якій розташовано сам об'єкт, є ізольованою від відкритої мережі, для підтримки віддаленого доступу потрібно в першу чергу забезпечити виходи у глобальну мережу. Як раз із цією метою і використовуємо три мобільні телефони під управлінням системи Android. Для підтримки високої надійності та оптимізації роботи системи, телефони використовують з'єднання через різних мобільних операторів зв'язку (Vodafone, Kyivstar, Lifecell). Вони підключаються до робочих місць за допомогою USB-to-microUSB кабелів. При цьому у налаштуваннях системи Android потрібно в ручну увімкнути режим модему (USB tethering). Таким чином на пристроях з'явиться мережевий адаптер із підтримкою технології Ethernet, що має назву Remote NDIS based Internet Sharing Device.

Із списку публічних вузлів мережі Yggdrasil, який наведений на сайті <https://publicpeers.neilalexander.dev/> можна обрати потрібні, або ознайомитись із доступними. Хоча список містить лише ті вузли, які є доступними, його зручно використовувати при підключенні до мережі завдяки отриманню і іншій інформації про потрібні, або доступні вузли, а саме: географічному розташуванні вузла (у якій країні); необхідній версії клієнта; статусу вузла, який оновлюється щогодини (онлайн/офлайн) та орієнтовній надійності.

Для досліджуваної системи обрано чотири публічних вузла, вони відмічені як "reliable": `tls://193.111.114.28:1443` (Україна); `tls://54.37.137.221:11129` (Польща); `tcp://193.107.20.230:7743` (Німеччина); `tls://185.165.169.234:8443` (Румунія). Ці вузли розташовано географічно віддалено один від одного, але вони є найближчими до об'єкту, з метою зменшення ймовірності їх одночасної відмови та мінімізації затримки. Для перевірки надійності вузлів створено bash-скрипт, який кожні 30 секунд перевіряє з'єднання з потрібним вузлом, пересилаючи йому ICMP-пакет. Якщо відповідь не отримана впродовж перших 20 секунд, система фіксує відсутність зв'язку. Інформація про активність вузла записується у файл CSV, який в подальшому використовується для побудови графіку доступності. Окрім цього формується файл із параметрами перевірки зв'язку, а саме кількістю відправлених та отриманих пакетів. Процес завершується тільки після зупинки його користувачем.

В підсумку маємо, що протягом двох тижнів не відбулося жодної одночасної відмови всіх обраних публічних вузлів, з чого робимо висновок про їх достатню надійність. В другій частині рисунку 2 наведено структуру логічних з'єднань системи (маршрутів пересилання даних), де: PC є тонкими клієнтами; PP є обраними публічними вузлами, а RPC є віддаленими робочими місцями.

Маючи доступ у глобальну мережу, встановлюємо на локальні робочі місця серверну частину TigerVNC маючи за мету забезпечити, при необхідності, віддалене керування самими робочими місцями [7]. У контрольній панелі TigerVNC налаштовується пароль підключення до робочого місця. Також у вкладці Inputs потрібно увімкнути опцію Send raw keyboard events to applications. При цьому застосовувати окремо шифрування самого з'єднання не потрібно, оскільки всі з'єднання в мережі Yggdrasil підтримують шифрування за замовчанням [11]. З метою встановлення і налаштування клієнту мережі Yggdrasil використовуємо реалізовану утиліту YggVPN.

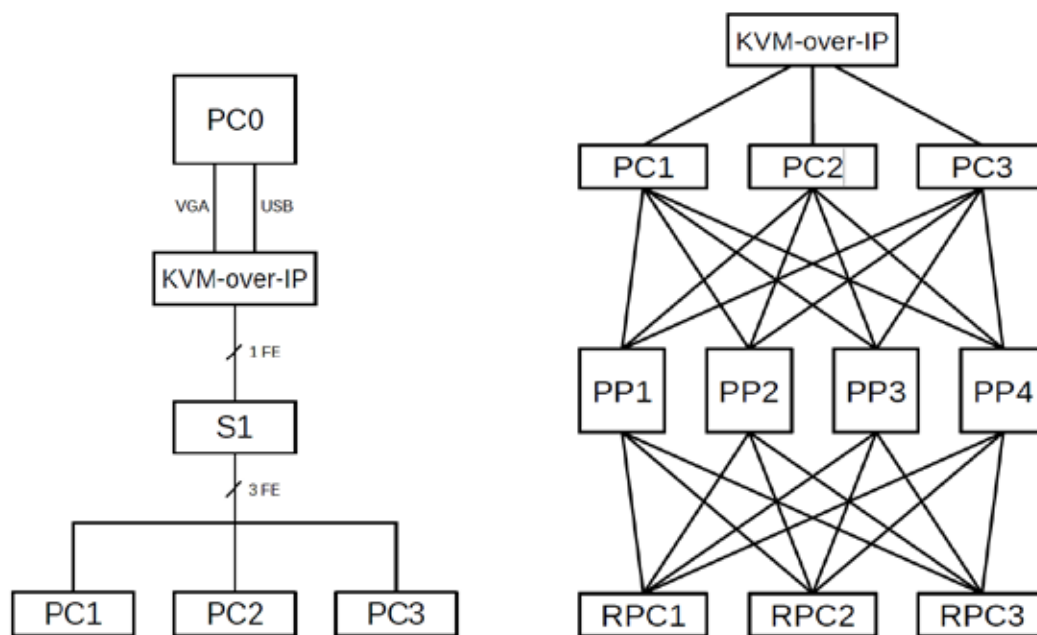


Рис. 2. Структура системи об'єкту та маршрутів пересилання даних

При цьому враховуємо, що деяке антивірусне програмне забезпечення може помилково сприймати її як загрозу, тому перед активуванням цю утиліту потрібно додати до списку винятків. При виконанні утиліти YggVPN на першому робочому місці, вводимо адреси обраних публічних вузлів та ім'я цього робочого місця – pc1.ygg. Далі всі кроки налаштування експортуються у файл yggvpn_export.conf, використовуючи команду “ec” і утиліта закривається командою “q”. Налаштування другого робочого місця виконується аналогічно, але вже з файлом конфігурації, який експортується з налаштуваннями першого робочого місця. Тому вже не потрібно вводити адреси публічних вузлів, лише ім'я другого робочого місця – pc2.ygg та команду для експорту налаштувань. Аналогічним чином за допомогою yggvpn_export.conf з PC2 налаштовується і третє робоче місце. Таким чином, експортований файл конфігурації використовується для налаштування усіх віддалених робочих місць. Для того, щоб забезпечити надійне з'єднання з комутатором KVM-over-IP, використовуючи локальні робочі місця, на всіх PC необхідно налаштувати перенаправлення з локального порту 5990 на порт 5900 для всіх вхідних IPv6-з'єднань комутатора, використовуючи стандартний порт VNC та, наприклад, адресу 192.168.1.100. Для цього застосовуємо системну утиліту netsh і команду, яку слід виконувати від імені адміністратора:

```
netsh interface portproxy add vbtov4 listenport=5990 onnectaddress=192.168.1.100 connectport=5900
```

Якщо телефон при цьому отримує, наприклад, адресу 192.168.42.129 вона і буде використовуватися у якості шлюзу за замовчанням. Це значення є постійним і однаковим для усіх версій системи Android, що надає та підтримує можливість звернення до самого телефону за цією адресою. У разі необхідності цю можливість можна використати при віддаленому керуванні телефоном, для цього достатньо встановити на нього додаток droidVNC-NG (рис. 3), який є реалізацією VNC-сервера для системи Android [16], а також виконати перенаправлення портів за допомогою утиліти netsh.

У додатку задається пароль доступу, потім потрібно увімкнути запуск і при завантаженні системи запустити потрібну службу. Зауважте, що при першому запуску надаємо дозволи додатків спеціальних можливостей (Accessibility).

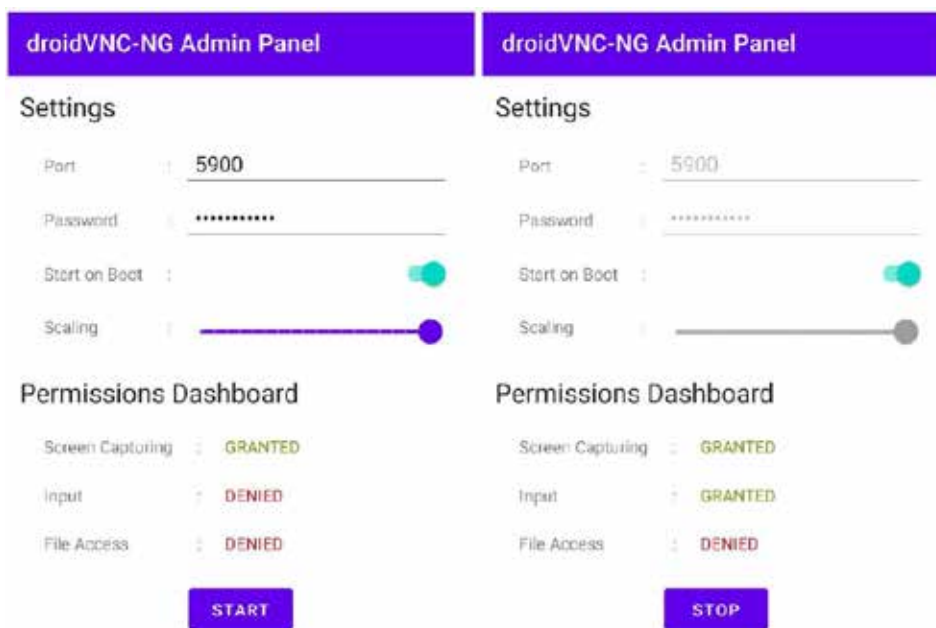


Рис. 3. Інтерфейс додатку droidVNC-NG

Далі наведемо команду для перенаправлення IPv6-з'єднань для порту 5909 кінцевого пристрою на порт 5900 підключеного телефону (192.168.42.129):

```
netsh interface portproxy add v6tov4 listenport=5909 connectaddress=192.168.42.129 connectport=5900
```

Віддалене керування об'єктом здійснюється із трьох віддалених робочих місць під управлінням системи Windows. Клієнт мережі Yggdrasil на них встановлюється та налаштовуються з використанням останнього експортованого файлу конфігурації. При додаванні потрібного робочого місця до системи, його Yggdrasil адресу вносимо до списку хостів на кожному із вже підключених локальних робочих місць за допомогою утиліти YggVPN. Потім достатньо встановити клієнт TigerVNC та перевірити з'єднання з об'єктом, використовуючи імена робочих місць та номери портів.

Структуру налаштованої системи наведено на рисунку 4, де додатково: Р є мобільними телефонами; а CBS є базовою станцією коміркового зв'язку.

Для перевірки роботи системи виконуємо підключення до робочого столу першого робочого місця із одного з інших віддалених робочих місць. Для цього на клієнті TigerVNC вводимо адресу pc1.ygg:5900 та обираємо Connect. Далі вводимо попередньо встановлений пароль доступу. За портом 5990 отримуємо доступ безпосередньо до керованого об'єкту PC0 використовуючи комутатор KVM-over-IP. Також за портом 5909, аналогічним чином, можемо отримати доступ до першого телефону. Для інших віддалених об'єктів та локальних робочих місць результати перевірки є аналогічними. При цьому, навіть при зникненні з'єднання із відкритою мережею у двох із трьох локальних робочих місць, вони все одно будуть доступними завдяки автоматично організованого зв'язку між клієнтами Yggdrasil, завдяки маршруту через третє робоче місце.

Наведені результати дозволяють зробити висновки, що засобами мережі Yggdrasil із захистом VNC-серверів забезпечується конфіденційність зв'язку та виключається несанкціонований доступ до віддаленого об'єкту.

Висновки. У роботі проведено дослідження актуальних на сьогодні методів та алгоритмів реалізації систем віддаленого керування, виявлено їх недоліки та запропоновано варіант реалізації віддаленого керування об'єктом критичної інфраструктури використовуючи накладену децентралізовану мережу Yggdrasil. В процесі виконання роботи авторами проаналізовано наявні готові рішення, визначено вимоги до системи віддаленого керування об'єктом і запропоновано її реалізацію через Yggdrasil при використанні мобільних телефонів із підтримкою протоколу RNDIS та мереж мобільних операторів зв'язку, а також спеціального клієнтського програмного забезпечення. Для оптимізації процесу коректного встановлення та налаштування клієнта мережі Yggdrasil на кінцевих пристроях, мовою С реалізовано конфігураційну утиліту YggVPN, яку також можна використовувати і поза сценарієм віддаленого керування інфраструктурним об'єктом. Тестований екземпляр системи реалізовано на конкретному прикладі з використанням клієнтського/серверного програмного забезпечення TigerVNC для робочих місць та додатку droidVNC-NG для віддаленого керування телефонами. Для забезпечення зв'язку робочих місць з віддаленим об'єктом обрано чотири публічні вузли мережі Yggdrasil. Надійність вузлів протестована шляхом перевірки зв'язку протягом наведеного часу. Усі залучені програмні компоненти мають відкритий вихідний код. Система є децентралізованою – для

віддаленого керування об'єктом достатньо мати в доступі публічний вузол та одне віддалене і локальне робоче місце. Засобами мережі Yggdrasil та паролемним захистом VNC-серверів забезпечується конфіденційність зв'язку та виключається несанкціонований доступ до об'єкту. Зв'язок з об'єктом здійснюється через глобальну мережу, тим самим забезпечуючи мобільність віддалених операторів та робочих місць, при цьому система підтримує будь-які додаткові канали зв'язку самого об'єкта через мережу.

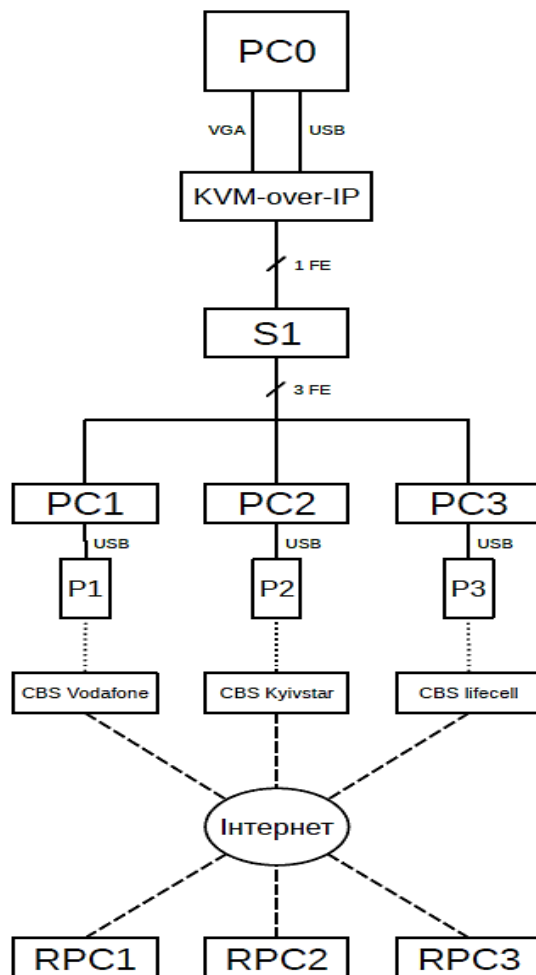


Рис. 4. Структура налаштованої системи

Ненадійність централізованих ієрархічних систем зв'язку, вимагає нового підходу до сітчастої мережі, де межа між маршрутизацією та кінцевими пристроями стає розмитою. В подальшому планується проведення дослідження того, наскільки схема маршрутизації Yggdrasil підходить для розгортання великомасштабних децентралізованих комунікаційних мереж. Маршрутизації, в якій вузли самостійно генерують свої адреси, використовуючи для адресації асиметричне наскрізне шифрування з однаковими ключами. При цьому частини об'єднаної мережі можна з'єднувати через будь-які інші мережі IPv4/6, в яких ці кінцеві вузли розташовані.

Список використаних джерел:

1. Конституція України: Закон України “Про критичну інфраструктуру” від 21.06.2024 № 1882-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20> (дата звернення: 05.09.2024).
2. Collier K., Grudinin A. Ukraine’s top mobile internet company says it has been hit by Russian cyberattack. NBC News. URL: <https://www.nbcnews.com/tech/security/ukraines-top-mobile-internet-company-blames-russian-cyberattack-rcna129253> (date of access: 05.09.2024).
3. Пестов О. Д. Розробка системи віддаленого управління об'єктами критичної інфраструктури. Національний університет «Запорізька політехніка», 2023.
4. Kirichek G., Kyrychek D., Hrushko S., Timenko A. Implementation the Protection Method of Data Transmission in Network. In: *ATIT-2019*. P. 29–132.

-
5. Рудьковський О.Р., Киричек Г.Г. Програмний комплекс з підтримки розподіленої взаємодії мережевих пристроїв та додатків. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2021. Вип.32(71). № 2. С. 229–234.
 6. Cheruvu S., Kumar A., Smith N., Wheeler DM. IoT software security building blocks. *Demystifying Internet of Things Security: Successful IoT Device/Edge and Platform Security Deployment*. 2020. P. 213-346.
 7. TigerVNC. URL: <https://tigervnc.org/> (дата звернення: 05.09.2024).
 8. Yggdrasil Network. URL: <https://yggdrasil-network.github.io/> (дата звернення: 05.09.2024).
 9. Kothari K., Palwankar T., Dubey A., Parate P. Tor vs Yggdrasil: Comparative Study of Two Different Communication System. In *2022 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*. IEEE. 2022. P. 452-456.
 10. Киричек Г.Г., Щетинін М.О. Конфігурація серверів з використанням Ansible. *Publishing House “Baltija Publishing”*. 2021. P. 15–17.
 11. Tang W., Han Y., Ai T., Li G., Yu B., Yang X. Yggdrasil: Reducing Network I/O Tax with (CXL-Based) Distributed Shared Memory. *Proceedings of the 53rd International Conference on Parallel Processing*. 2024. P. 597-606.
 12. Киричек Г.Г., Гаркуша В.Ю. Віртуалізація хостів на основі Proxmox VE в умовах надлишкового використання ресурсів. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2021. Вип. 32 (71). № 1. С. 78–84.
 13. Costa PA, Rosa A., Leitão J. Enabling Wireless Ad Hoc edge systems with yggdrasil. *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on Applied Computing*. 2020. P. 2129-2136.

References:

1. Konstytutsiia Ukrainy: Zakon Ukrainy “Pro krytychnu infrastrukturu” [Constitution of Ukraine: Law of Ukraine «On Critical Infrastructure»] dated June 21, 2024 No.1882-IX. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1882-20> (date of access: 05.09.2024) [in Ukrainian].
2. Collier K., Grudin A. Ukraine’s top mobile internet company says it has been hit by Russian cyberattack. *NBC News*. URL: <https://www.nbcnews.com/tech/security/ukraines-top-mobile-internet-company-blames-russian-cyberattack-rcna129253> (date of access: 05.09.2024).
3. Pestov O. D. (2023). Rozrobka systemy viddalenoho upravlinnia ob'ektamy krytychnoi infrastruktury [Critical infrastructure objects remote control system development]. *Zaporizhzhia Polytechnic National University* [in Ukrainian].
4. Kirichek, G., Kyrychek, D., Hrushko, S., Timenko, A. Implementation the Protection Method of Data Transmission in Network. In: *ATIT-2019*, P. 29–132.
5. Rudkovskiy O.R., Kyrychek H.H. (2021) Prohramnyi kompleks z pidtrymky rozpodilenoї vzaiemodii mrezhevykh prystroiv ta dodatkov [A software complex supporting the distributed interaction of network devices and applications]. *Scientific notes of TNU named after V.I. Vernadskyi. Series «Technical Sciences»*, 32(71), 2, 229–234 [in Ukrainian].
6. Cheruvu S., Kumar A., Smith N., Wheeler DM. (2020). IoT software security building blocks. *Demystifying Internet of Things Security: Досвідчений IoT Device/Edge and Platform Security Deployment*, 213-346.
7. TigerVNC. URL: <https://tigervnc.org/> (date of access: 05.09.2024).
8. Yggdrasil Network. URL: <https://yggdrasil-network.github.io/> (date of access: 05.09.2024).
9. Kothari K., Palwankar T., Dubey A., Parate P. (2022). Tor vs Yggdrasil: Comparative Study of Two Different Communication System. In *2022 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, 452-456.
10. Kyrychek H.H., Shchetinin M.O. (2021). Configuring servers using Ansible. *Publishing House “Baltija Publishing”*, 15–17.
11. Tang W., Han Y., Ai T., Li G., Yu B., Yang X. (2024). Yggdrasil: Reducing Network I/O Tax with (CXL-Based) Distributed Shared Memory. *Proceedings of the 53rd International Conference on Parallel Processing*, 597-606.
12. Kyrychek H.H., Harkusha V.Yu. (2021) Virtualizatsiia khostiv na osnovi Proxmox VE v umovakh nadlyshkovoho vykorystannia resursiv [Virtualization of hosts based on Proxmox VE in conditions of excessive use of resources]. *Scientific notes of TNU named after V.I. Vernadskyi. Series «Technical Sciences»*. 32 (71), 1, 78–84 [in Ukrainian].
13. Costa PA, Rosa A., Leitão J. (2020). Enabling Wireless Ad Hoc edge systems with yggdrasil. *Proceedings of the 35th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, 2129-2136.

Streltsov O. V., Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Assistant Professor at the Computer Systems
Department of Odesa Polytechnic National University.
ORCID: 0000-0002-4691-5703

Hrynyov M. A., Postgraduate Student at the Computer Systems
Department of Odesa Polytechnic National University.
ORCID: 0009-0007-7189-4485

Skalozub V. Yu., Postgraduate Student at the Computer Systems
Department of Odesa Polytechnic National University.
ORCID: 0000-0003-4627-2346

Buyukli D. M., Postgraduate Student at the Computer Systems
Department of Odesa Polytechnic National University.
ORCID: 0009-0009-6159-175X

MOBILE ROBOT NAVIGATION BASED ON LASER RANGE-METRY METHODS

The article is devoted to solving the problem of finding people who are under the debris of destroyed buildings, which requires an urgent solution to ensure an effective rescue operation. The primary focus of this research is the development and refinement of a navigation system for a mobile rescue robot. This paper specifically explores localization techniques and methods for constructing a map of an unknown environment, which are crucial for the robot's effective operation in complex and dynamic settings. The overarching goal of the study is to identify the most adaptable and precise navigation method that can effectively manage the movement of a mobile robot in environments characterized by unpredictable and shifting obstacles. To solve the tasks, modern methods of laser telemetry and SLAM methods (Simultaneous Localization and Mapping) are used in the work, which are used to accurately create a map of the territory and localize the robot on it. The research proposes an innovative algorithm for the navigation system of a mobile robot, which leverages laser telemetry to meticulously scan the surrounding area. It has been shown that scanning process is essential for real-time data acquisition, enabling the robot to make informed decisions regarding its movement. It is stated that, the proposed lidar-based navigation method is particularly advantageous as it facilitates the creation of a detailed spatial map, even in environments where the layout is not known in advance. This approach allows for the precise determination of the robot's position within the mapped space, ensuring that the robot can navigate effectively and avoid potential hazards. It is proved that, the integration of these advanced techniques significantly enhances the robot's ability to perform in search and rescue missions, where the accurate and timely localization of trapped individuals is of paramount importance.

Key words: mobile robot, navigation system, laser range finder, scanning lidar, terrain map, dynamic obstacles.

Стрельцов О. В., Гриньов М. А., Скалозуб В. Ю., Буюкли Д. М. Навігація мобільного робота на основі методів лазерної дальнометрії

Стаття присвячена вирішенню проблеми пошуку людей, які знаходяться під уламками зруйнованих будівель, що потребує невідкладного вирішення для забезпечення ефективної рятувальної операції. У статті розглянуто використання сучасних технологій залучення до пошуково-рятувальних робіт мобільних роботів, здатних самостійно орієнтуватися в складних умовах завалів. В даній роботі основним об'єктом дослідження виступає система навігації, призначена для таких мобільних пошукових роботів. Предметом дослідження є методи визначення місця розташування робота та побудови карти невідомої території, що є критично важливим для успішного виконання завдань пошуку і порятунку. Метою даного дослідження є визначення найбільш універсального та точного способу навігації, який дозволить ефективно керувати рухом мобільного робота в умовах наявності динамічних перешкод, що постійно змінюються. Для вирішення поставлених завдань в роботі використані сучасні методи лазерної далекометрії та SLAM-методи (Simultaneous Localization and Mapping), які застосовуються для точного створення карти території та локалізації робота на ній. У рамках дослідження запропоновано новий алгоритм керування навігаційною системою мобільного робота, який базується на використанні методу лазерної далекометрії для сканування навколишнього середовища. Показано, що метод дозволяє детально сканувати простір навколо робота та забезпечує отримання точних даних про розташування об'єктів і можливих перешкод. Зазначено, що запропонований підхід до навігації, що базується на використанні лідара, надає роботу можливість створювати карту простору навіть у тих випадках, коли структура цієї території невідома заздалегідь. Використання методу дозволяє точно визначити позицію робота на створеній карті, що є ключовим для забезпечення безпечного та ефективного руху в умовах завалів. Показано, що

© O. V. Streltsov, M. A. Hrynyov, V. Yu. Skalozub, D. M. Buyukli, 2024

використання лідара значно підвищує точність орієнтації робота в просторі, що в свою чергу, сприяє успішному виконанню рятувальних операцій, де швидкість та своєчасність має вирішальне значення. Доведено, що завдяки цим можливостям робот здатний уникати перешкод та швидко адаптуватися до змінної ситуації, що виникає під час проведення пошукових робіт у завалах.

Ключові слова: мобільний робот, система навігації, лазерний далекомір, скануючий лідар, карта місцевості, динамічні перешкоди.

Introduction. Currently, in most developed industrial countries, there is active development in the field of mobile robotics. A mobile robot is a device capable of autonomously moving through space and performing assigned tasks with a high degree of independence. Military organizations and security services show particular interest in the development of such robots, as they can perform tasks in environments that are hazardous to human life. Additionally, there is growing interest in robots designed to assist in daily life, such as vacuum cleaner robots and guide robots, as well as in entertainment devices like robotic dogs and quadcopters [1].

Despite significant advancements in robotics, navigation remains the primary challenge in developing such devices. The onboard control system of a robot must be capable of planning routes, managing movement parameters, accurately processing data from sensors about the surrounding environment, and determining its own coordinates in complex environments with dynamic obstacles. Existing navigation systems are well-suited for use in industrial settings, where the environment is deterministic and static.

However, in unknown environments, existing navigation algorithms either do not provide sufficient accuracy and reliability for robot localization or require significant computational resources. This affects the size and weight parameters, as well as energy consumption, which in turn impacts the duration of autonomous operation [2].

The aim of this research is to find the most versatile and precise navigation method for controlling the movement of a mobile robot in environments with dynamic obstacles.

Methods of mobile robot navigation. Currently, there are three main navigation schemes for mobile robots.

Global navigation involves determining the absolute coordinates of the robot while moving over long distances in open terrain, where GPS is used to obtain the coordinates. This method provides a relatively high accuracy with an error range of 1-3 meters but cannot be used in enclosed spaces.

Local navigation determines the current position of the robot relative to a specific point, usually the starting point, and is suitable for performing tasks within a predefined area. However, its accuracy is limited, with errors reaching up to 150 meters.

Personal navigation enables the robot to identify parts of its own structure and interact with nearby objects. It is used for robots equipped with manipulators and includes the use of encoders, orientation by markers, line following, and so on, but it suffers from limited system flexibility.

The most promising direction in improving mobile robot navigation systems is the capability to store a complete map of the environment in the robot's memory. Three-dimensional maps are the most effective, yet their storage and processing by the onboard control system require substantial computational resources. The task of creating a map involves maintaining a description of the surrounding environment so that, in the future, the robot can determine its position on it. This map is used to plan potential movement trajectories or to select the optimal position for object capture [3].

Analysis of the methods and tools for mobile robot navigation has demonstrated that one of the most effective approaches for route mapping is the use of a scanning laser rangefinder. Research findings in the field of mobile robot navigation indicate that the use of a laser rangefinder allows for achieving high localization accuracy.

The core of a laser rangefinder is a LiDAR (Light Detection and Ranging). LiDAR is a device that implements a technology for acquiring and processing information about distant objects using electromagnetic radiation. The operating principle of LiDAR is illustrated in Fig. 1 [4].

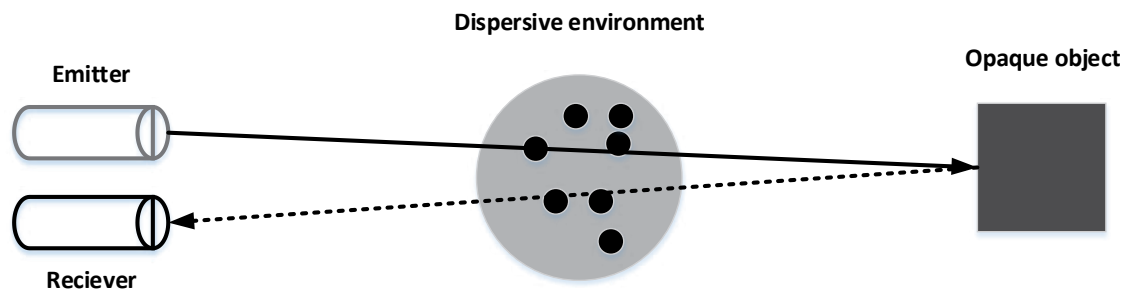


Fig. 1. The principle of lidar operation

The directed beam from the emitter is reflected from the targets and returns to the receiver. The distance to a point on the object's surface can be calculated as

$$L = 0.5 \times c \times t, \quad (1)$$

where c – speed of light; t – the total time the light travels to the reflection point and back; L – distance to the reflection point [5].

In the table 1 shows data showing the dependence of the response time on the distance to the object.

Table 1

Dependence of the response time on the distance to the target

Distance	1m	10m	100m	1km	10 km	100km
Time	6.7 ns	67ns	0.67 us	6.7 us	67 us	0.67s

Most lidars consist of three parts: a transmitter, a receiver, and a control system (Fig. 2).

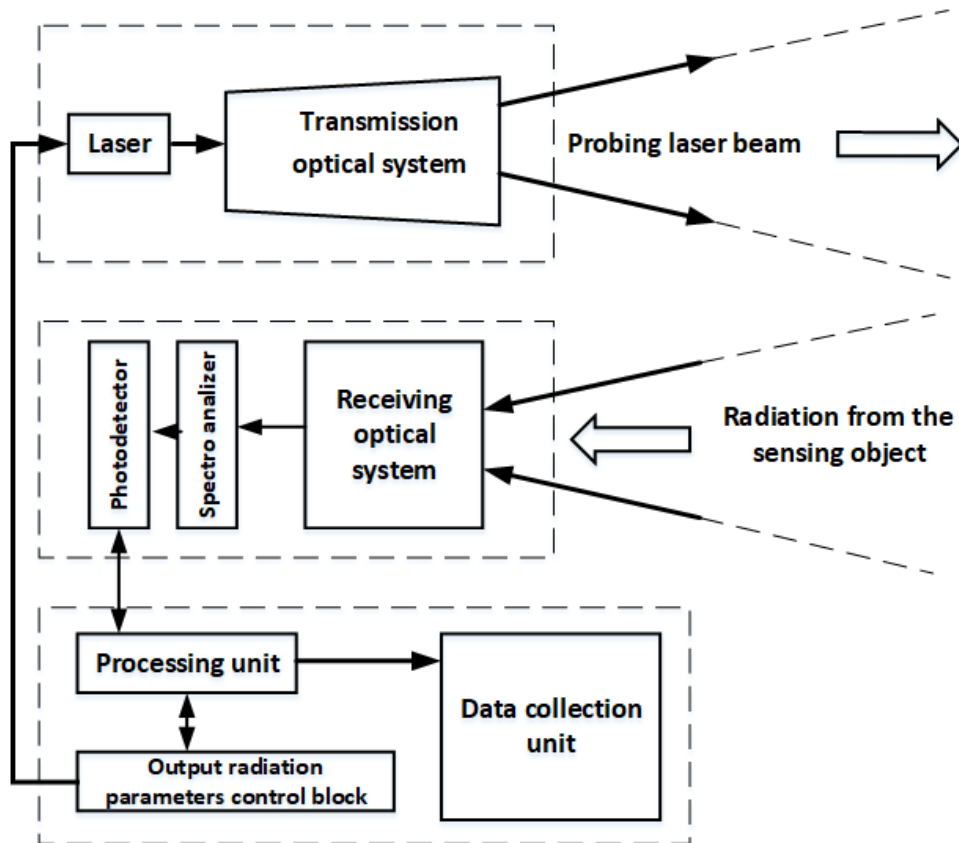


Fig. 2. The lidar structure

The transmitter comprises a radiation source, which is typically a laser, and an optical system for shaping the outgoing laser beam, allowing for control over the spot size and beam divergence. In the majority of designs, the emitter is a laser that generates short pulses of light with high peak power.

The pulse repetition rate or modulation frequency is selected such that the interval between consecutive pulses is no shorter than the response time from detected targets, which may be located beyond the calculated operating range of the device. The receiver consists of a lens, a spectral and/or spatial filter, a polarization component, and a photodetector. The radiation reflected and scattered from the object under investigation is collected by the receiving optics and then passes through a spectral analyzer. This device isolates the wavelength range for observations and filters out background radiation at other wavelengths. The analyzer can be a complex, precisely tuned mono- or polychromator or a set of narrow-band filters, including a notch filter that blocks radiation at the wavelength of the laser transmitter [6].

The emitter and receiver unit can either be separated by a considerable distance or integrated into a single block. The axes of the transmitter and receiver may be aligned (coaxial configuration) or separated (biaxial configuration) [7].

The control system of the LiDAR performs the following functions:

- regulating the operating mode of the LiDAR;

- controlling the frequency of the probing laser radiation;
- measuring the energy in the outgoing and received laser beams at both frequencies;
- processing data to obtain the spectral characteristics of the atmosphere, as well as detecting and determining the concentrations of impurities based on the “spectral signatures” of molecules stored in the computer’s database;
- managing the LiDAR targeting system towards the object of study [8].

Research progress. The subject of this study is a navigation system designed for a mobile search robot intended to detect individuals trapped under debris from collapsed structures. The challenge in navigating such robots lies in determining their position in space while moving through a dynamic and unpredictable environment.

In general terms, the navigation problem can be defined as follows: a certain space contains a mobile robot equipped with a laser rangefinder. A target point is specified that the robot must reach to perform a specific task. It is necessary to establish a control law for the mobile robot that ensures its movement from the initial position to the target point. This task is complicated by several problems, conditions, and constraints:

1. The robot must determine its location in space to accurately position itself relative to the target point.
2. It is necessary to avoid static obstacles, which requires building a map of the environment.
3. Dynamic obstacles complicate the map-building process.
4. The robot’s movement to the target point must be optimized in terms of time.

Solving the navigation problem for a mobile robot in space requires simultaneously addressing the issues of localization and map building, or updating the map with newly detected objects. Currently, either the task of localization based on an existing map or the task of map construction given a known robot trajectory is solved. A general approach that simultaneously addresses these tasks with the required accuracy and independently of the environmental characteristics does not yet exist. Moreover, solving these tasks is significantly complicated by the fact that navigation sensors have errors, making it impossible to determine the exact trajectory of movement.

It was decided to represent the robot’s location within a system of local coordinates related to the robot’s initial position, as a priori information about its location in space is not available. The robot autonomously constructs a map of its path.

In robotics, SLAM methods (simultaneous localization and mapping) are commonly used for robot navigation and positioning. SLAM methods allow for the construction of a map of an environment whose structure is initially unknown and the determination of the robot’s position on it. The use of SLAM methods enables the optimization of the robot’s trajectory, but only in a static environment. Figure 3 shows the maps built by the robot’s navigation system before applying SLAM methods (Fig. 3a) and after (Fig. 3b) [9].

In a dynamic environment, the movement of obstacles cannot be calculated in advance, as the environment is generally non-deterministic, making it impossible to pre-plan a route that ensures safe navigation.

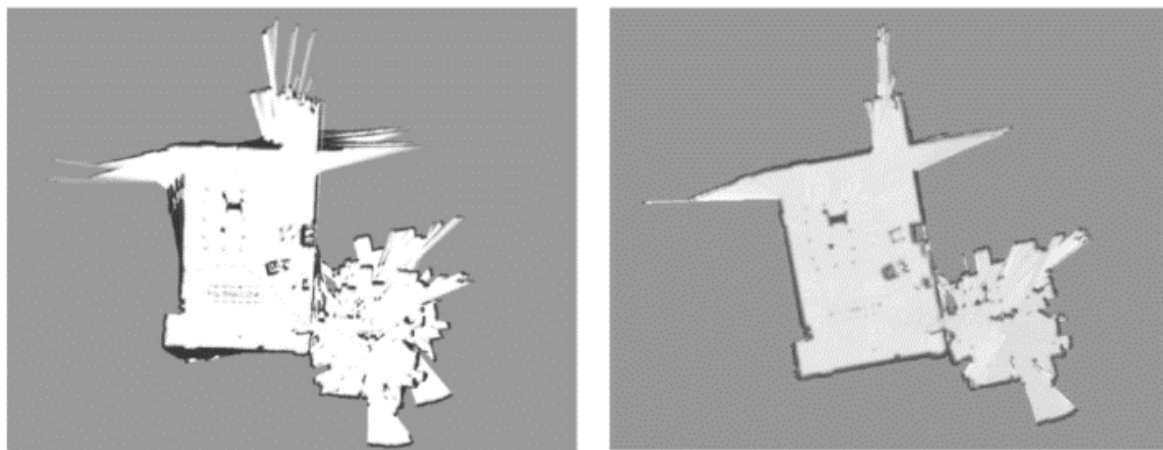


Fig. 3. Optimization of the terrain map using SLAM methods:
a- before application (“raw data”); b – after processing one of the SLAM methods

To avoid collisions with dynamic obstacles, it is necessary to determine their current positions and predict their movement trajectories. This allows the robot to follow a planned trajectory while deviating at the appropriate moment to maneuver around obstacles. Therefore, an effective solution for navigating in a dynamic environment involves considering the movement of obstacles directly within the control loop of the mobile robot [10].

This study proposes an algorithm for a navigation system that accounts for the dynamics of the robot’s movement, the positions of obstacles, and avoids collisions with them. The control algorithm for the rescue robot’s navigation system is illustrated in Fig. 4.

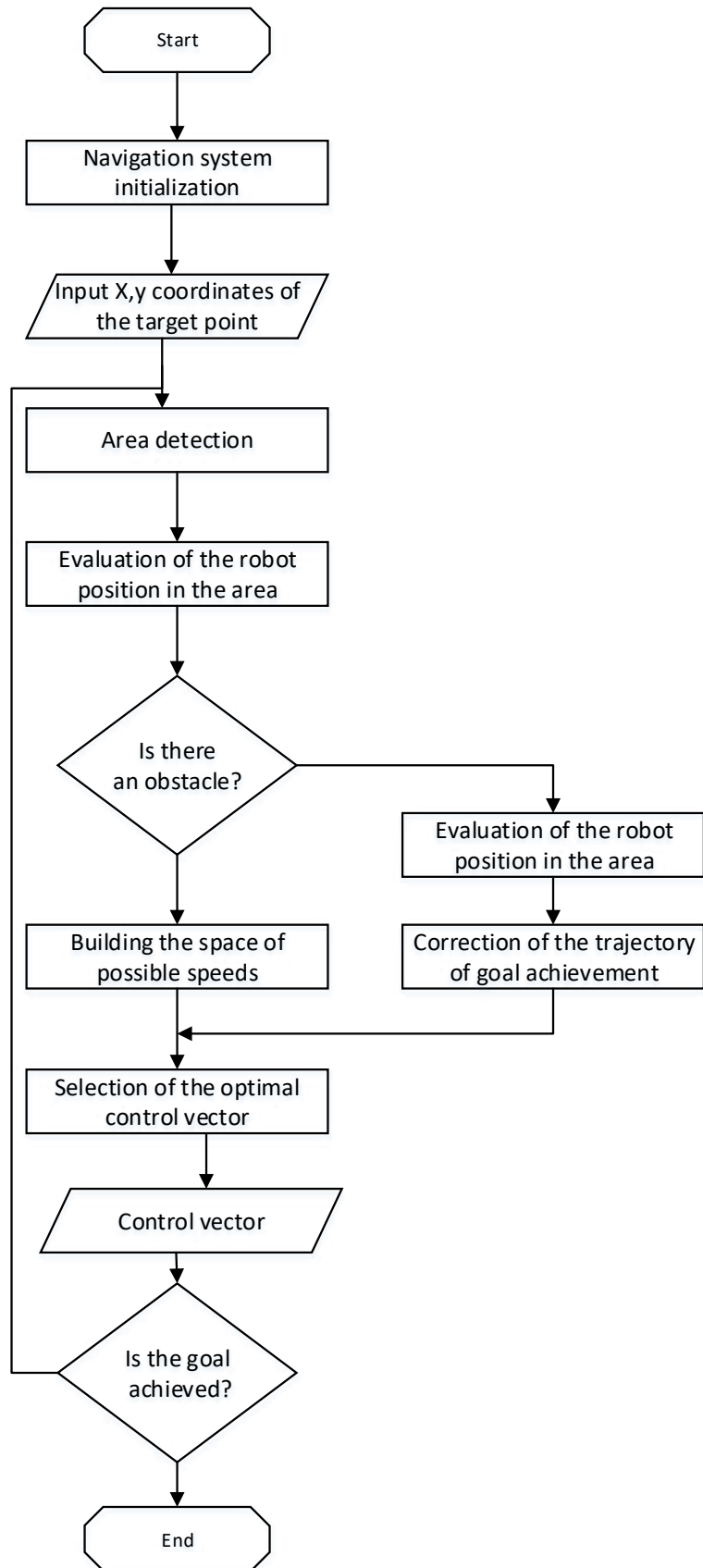


Fig. 4. Algorithm of control system of search robot navigation

The operation of the proposed navigation system for the rescue robot functions through a series of well-defined stages that enable it to navigate efficiently in complex environments. Initially, the lidar, a crucial component of the system, generates a detailed three-dimensional point cloud, which accurately represents the robot's surrounding environment. This point cloud consists of numerous data points that capture the spatial characteristics of the area, including any potential obstacles. The data collected by the lidar is then transmitted to the robot's navigation system, where it is processed to construct an initial map of the area. This map provides a visual representation of the environment, highlighting both the layout of the terrain and the location of any obstacles that could impede the robot's movement.

Once the initial map and obstacle map are established, the navigation system determines the robot's position within this mapped environment. With this information, the system continuously updates both the map and the obstacle map as the robot moves. This dynamic updating process is critical because it allows the navigation system to adapt to changes in the environment, such as moving obstacles or changes in terrain. At each step of the algorithm, the navigation system refines the map of obstacles and accurately assesses the robot's current position relative to these obstacles.

The continuous flow of data from the lidar plays a crucial role in enabling the navigation system to constantly optimize the control vector, which is essentially the set of commands that dictate the robot's movement. As the lidar scans the environment, it generates a real-time stream of data that captures the spatial characteristics of the robot's surroundings, including any obstacles that may be present. This data is immediately analyzed by the navigation system, which uses advanced algorithms to update the map of the environment and refine the obstacle map. By processing this updated information, the system can dynamically adjust the robot's path to avoid collisions and ensure that it follows the most efficient route to its intended target destination.

The design of the entire control process is inherently iterative, meaning that the system continuously re-evaluates the robot's trajectory as it receives new data from the lidar. This iterative approach allows the navigation system to make real-time adjustments to the robot's movements, ensuring that it can respond effectively to any changes in the environment, such as the sudden appearance of a new obstacle or a shift in the terrain. This adaptability is particularly important in rescue missions, where the environment is often unpredictable and can change rapidly. The navigation system's ability to adjust the robot's path on the fly is key to its success in navigating through complex and potentially hazardous areas.

Conclusion. The proposed navigation method for a mobile robot using lidar offers the capability to construct a detailed map of an environment with an unknown and potentially complex structure, while simultaneously determining the precise position of the robot within that environment. This advanced approach allows the robot to navigate effectively in unfamiliar or dynamically changing surroundings.

However, the necessity of employing rigid logic within the navigation system imposes certain limitations, notably reducing the robot's maneuverability and overall speed. These constraints can hinder the robot's ability to respond quickly to sudden changes in the environment or to take the most efficient paths. Therefore, to address these challenges and optimize the movement trajectory of the robot, it is advisable to incorporate artificial intelligence (AI) technologies into the navigation system. By integrating AI, the robot can adapt to its surroundings more fluidly, make real-time decisions, and enhance its navigation capabilities, leading to improved performance in complex scenarios.

Bibliography:

1. Четверта доба: розумні роботи, свідомі комп'ютери і майбутнє людства. URL: <https://kmbs.ua/index.php/ua/article/the-fourth-age>
2. Ганенко Л.Д., Жебка В.В. Аналітичний огляд питань навігації мобільних роботів в закритих приміщеннях. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2023. № 3(80): С. 85–98 doi: 10.31673/2412-4338.2023.038087
3. Lee G. H., Marcelo H. Ang Jr. Mobile Robots Navigation, Mapping, and Localization Part I, Encyclopedia of Artificial Intelligence, 2009. doi: 10.4018/978-1-59904-849-9.ch158
4. Endres F., Hess J., Engelhard N. [et al.]. An evaluation of the RGB-D SLAM system. Robotics and Automation (ICRA): 2012 IEEE International Conference. 2012:1691–1696.
5. Lu F., Milios E. Robot pose estimation in unknown environments by matching 2d range scans. Journal of Intelligent and Robotic Systems. 1997;18(3):249–275.
6. Park J., Lee S., Park J. Correction robot pose for SLAM based on Extended Kalman Filter in a rough surface environment. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2009;6(2):67–72.
7. Eliazar A., Parr R. DP-SLAM: Fast, robust simultaneous localization and mapping without predetermined landmarks. Proceedings of the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI). 2003:1135–1142.
8. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2000; 22(11):1330–1334.
9. Steux B., Hanzaoui O.EI. TinySLAM: A SLAM algorithm in less than 200 lines C-language program. Control Automation Robotics & Vision (ICARCV): 11th International Conference. 2010:1975–1979.

10. Garrido-Jurado, S., Munos-Salinas R., Madrid-Cuevas F.J., Marin-Jimenez M.J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*. 2014; 47(6):2280–2292.

References:

1. Четверта доба: розумні роботи, свідомі комп'ютери і майбутнє людства. URL: <https://kmbs.ua/index.php/ua/article/the-fourth-age>
2. Hanenko L.D., Zhebka V.V. Analitichnyi ohliad pytan navihatsii mobilnykh robotiv v zakrytykh prymishchenniakh. *Telekomunikatsiini ta informatsiini tekhnolohii*. 2023. No 3(80): p. 85 – 98. doi: 10.31673/2412-4338.2023.038087
3. Lee G. H., Marcelo H. Ang Jr. Mobile Robots Navigation, Mapping, and Localization Part I, *Encyclopedia of Artificial Intelligence*, 2009. doi: 10.4018/978-1-59904-849-9.ch158
4. Endres F., Hess J., Engelhard N. [et al.]. An evaluation of the RGB-D SLAM system. *Robotics and Automation (ICRA): 2012 IEEE International Conference*. 2012:1691–1696.
5. Lu F., Milios E. Robot pose estimation in unknown environments by matching 2d range scans. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 1997;18(3):249–275.
6. Park J., Lee S., Park J. Correction robot pose for SLAM based on Extended Kalman Filter in a rough surface environment. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2009; 6(2):67–72.
7. Eliazar A., Parr R. DP-SLAM: Fast, robust simultaneous localization and mapping without predetermined landmarks. *Proceedings of the 18th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*. 2003:1135–1142.
8. Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2000; 22(11):1330–1334.
9. Steux B., Hanzaoui O.EI. TinySLAM: A SLAM algorithm in less than 200 lines C-language program. *Control Automation Robotics & Vision (ICARCV): 11th International Conference*. 2010:1975–1979.
10. Garrido-Jurado, S., Munos-Salinas R., Madrid-Cuevas F.J., Marin-Jimenez M.J. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. *Pattern Recognition*. 2014; 47(6):2280–2292.

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

УДК 004.056.55

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.9>

Козіна Г. Л., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційної безпеки та наноелектроніки
Національного технічного університету «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0002-4787-6865

Савченко Ю. В., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій
Університет митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-7177-6311

Воскобойник В. О., кандидат технічних наук, доцент,
професор кафедри інформаційної безпеки та наноелектроніки
Національного технічного університету «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0003-3786-8666

Прокопович-Ткаченко Д. І., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-6590-3898

Кацюба В. В., студент кафедри інформаційної безпеки
та наноелектроніки
Національного технічного університету «Запорізька політехніка»
ORCID: 0009-0004-4775-0172

МАТЕМАТИЧНИЙ ПІДХІД ДО ПІДВИЩЕННЯ ШВИДКОДІЇ ПРОГРАМНОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ КРИПТОАЛГОРИТМУ SM4

В статті запропоновано математичний підхід оптимізації алгоритму шифрування. Стаття присвячена підвищенню швидкодії обчислювальних алгоритмів, що є одним із важливих напрямків наукових досліджень. SM4 з метою підвищення швидкодії алгоритму. SM4 є досить поширеним алгоритмом, який використовується і зараз. На даний момент існує велика кількість апаратних та програмних реалізацій, в яких, використовуючи особливості архітектури чи мови програмування, можна забезпечити високу швидкодію алгоритму. Симетричні криптографічні алгоритми мають досить високу швидкодію в порівнянні з асиметричними. Симетричні алгоритми застосовуються для шифрування повідомлень або файлів великих розмірів. Нескладні етапи алгоритмів можуть зводитись до простих операцій. Такий підхід наведено в українському стандарті симетричного потокового шифрування ДСТУ 8845:2019 (алгоритм Струмок). Його особливість полягає в тому, що етапи алгоритму, нелінійна підстановка, яка виконується з використанням операції циклічного зсуву, множення члена поліному на елемент поля, спрощені до простої заміни з попередньо обчислених таблиць констант. В статті розкрито, що в результаті врахування цієї оптимізації Струмок дозволяє формувати псевдовипадкові послідовності із швидкістю понад 10 Гбіт/с. На сьогодні блоковий алгоритм шифрування SM4 широко використовується в бібліотеці LibreSSL, яка відповідає за встановлення безпечного мережевого підключення згідно протоколу SSL/TLS, та є частиною криптографічної бібліотеки Libgcrypt, яка є розробкою GNU Projects. З'ясовано, що не дивлячи на його поширеність, сам алгоритм не має шляхів оптимізації, які має Струмок. У статті здійснено оптимізацію математичного апарату SM4, в ході якої було використано особливість операції циклічного зсуву та зведено дію обчислення до прямої заміни із таблиць констант, як це було виконано в національному алгоритмі Струмок. У статті доказано, що оптимізація алгоритму представляє собою зведення обчислювальних операцій до прямої заміни з таблиць констант.

Ключові слова: симетричне шифрування, національний стандарт, швидкодія алгоритму, криптоалгоритм SM4, оптимізація обчислювальних операцій.

© Г. Л. Козіна, Ю. В. Савченко, В. О. Воскобойник, Д. І. Прокопович-Ткаченко, 2024

Kozina G. L., Savchenko Yu. V., Voskoboinyk V. O., Prokopovich-Tkachenko D. I., Katsiuba V. V. Mathematical approach to improving the performance of the programmed implementation of the SM4 cryptoalgorithm

The paper proposes a mathematical approach to optimizing an encryption algorithm. The article is devoted to improving the performance of computing algorithms, which is one of the important areas of scientific research. SM4 to improve the performance of the algorithm. SM4 is a fairly common algorithm that is still in use today. At the moment, there are a large number of hardware and software implementations in which, using the features of the architecture or programming language, it is possible to ensure high performance of the algorithm. Symmetric cryptographic algorithms have a fairly high performance compared to asymmetric ones. Symmetric algorithms are used to encrypt messages or large files. Simple stages of the algorithms can be reduced to simple operations. This approach is described in the Ukrainian standard for symmetric stream encryption DSTU 8845:2019 (the Stream algorithm). Its peculiarity lies in the fact that the stages of the algorithm, nonlinear substitution performed using the cyclic shift operation, multiplication of the polynomial term by the field element, are simplified to a simple replacement from pre-calculated tables of constants. The article reveals that, as a result of this optimization, Strumok allows to form pseudorandom sequences with a speed of more than 10 Gbps. Today, the SM4 block encryption algorithm is widely used in the LibreSSL library, which is responsible for establishing a secure network connection according to the SSL/TLS protocol, and is part of the Libgcrypt cryptographic library, which is developed by GNU Projects. It was found that despite its widespread use, the algorithm itself does not have the optimization paths that Strumok has. The article optimizes the mathematical apparatus of SM4, which uses the peculiarity of the cyclic shift operation and reduces the calculation action to a direct replacement from the tables of constants, as was done in the national algorithm Strumok. The article proves that the optimization of the algorithm is a reduction of computational operations to direct replacement from the tables of constants. The article describes how the tables of constants are formed, as it was done in the national algorithm Strumok. The article determines that the software implementation of the basic and optimized algorithms showed that the execution time of the optimized SM4 decreased by about 2.69 times, which means a positive impact of optimization on the algorithm's performance. The speedup was tested for different sizes of incoming messages.

Key words: symmetric encryption, national standard, algorithm performance, SM4 cryptoalgorithm, optimization of computing operations.

Постановка проблеми. Питання підвищення швидкодії обчислювальних алгоритмів є одним із важливих напрямків наукових досліджень. Існує безліч публікацій, наприклад [1-4], в яких описані різні підходи до вирішення цієї проблеми.

Симетричні криптографічні алгоритми мають досить високу швидкість у порівнянні з асиметричними. Причина цього полягає у тому, що в них не використовуються складні арифметичні операції, а деякі етапи зводяться до простих перетворень (наприклад, підстановки із таблиці констант чи перестановки біт). Тому симетричні алгоритми застосовуються для шифрування повідомлень або файлів великих розмірів.

Проте нескладні етапи алгоритмів можуть зводитись до ще більш простих операцій. Такий підхід наведено, наприклад, в українському стандарті симетричного потокового шифрування ДСТУ 8845:2019 (алгоритм Струм) [4]. Його особливість полягає в тому, що деякі етапи алгоритму (наприклад, нелінійна підстановка, яка виконується з використанням операції циклічного зсуву, або множення члена поліному на елемент поля) спрощені до простої заміни з попередньо обчислених таблиць констант. В результаті врахування цієї оптимізації Струм дозволяє формувати псевдовипадкові послідовності із швидкістю понад 10 Гбіт/с [5].

Блоковий алгоритм шифрування SM4, створений у 2006 році, є китайським національним стандартом [6, 7]. На сьогодні блоковий алгоритм шифрування SM4 алгоритм широко використовується й за межами Китаю, зокрема в бібліотеці LibreSSL [8], яка відповідає за встановлення безпечного мережевого підключення згідно протоколу SSL/TLS, та є частиною криптографічної бібліотеки Libgcrypt, яка є розробкою GNU Projects [9]. Проте, не дивлячи на його поширеність, сам алгоритм не має шляхів оптимізації, які має Струм.

Метою статті є дослідження і оптимізації SM4. Автори використовували переклад стандарту англійською мовою, створений у 2008 році [7]. Існують також реалізації алгоритму з використанням апаратних та програмних оптимізацій, але такі оптимізації реалізовані через особливість апаратної архітектури чи мов програмування. Тому, дивлячи на позитивний досвід алгоритму Струм, було проведено наступне: дослідження алгоритму SM4 та його основної функції; оптимізація алгоритму через створення таблиць констант; створення програмної реалізації основного та оптимізованого алгоритмів; проведення експерименту, в якому вимірюється час виконання алгоритмів при різних розмірах вхідних повідомлень; аналіз результатів тестування.

Виклад основного матеріалу

Алгоритм шифрування SM4

SM4 – це блоковий алгоритм, розмір ключа та розмір вхідного блоку якого мають довжину 128 біт. Архітектурою шифру є сітка Фейстеля. Шифрування блоку складається з 32 раундів нелінійних підстановок [7].

Основою шифрування є перетворення T . Функція T оперує 32-бітними блоками та представляє собою суперпозицію лінійної та нелінійної замін. Функція для генерації раундових ключів (1) та шифрування блоку (2) має наступний вигляд:

$$T(a_0, a_1, a_2, a_3) = L(\tau(a_0, a_1, a_2, a_3)), \quad (1)$$

$$T'(a_0, a_1, a_2, a_3) = L'(\tau(a_0, a_1, a_2, a_3)), \quad (2)$$

де $\tau(\cdot)$ – функція нелінійної заміни, $L, L'(\cdot)$ – функції лінійної заміни.
Нелінійна заміна $\tau(\cdot)$ обчислюється за формулами:

$$\tau(a_0, a_1, a_2, a_3) = (S(a_0), S(a_1), S(a_2), S(a_3)) = (b_0, b_1, b_2, b_3) = B, \quad (3)$$

де a_i – 8-бітне слово, $S(a_i)$ – підстановка з таблиці констант (S-блок, S-box).
Таблиця підстановки зображена на рис. 1.

	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	a	b	c	d	e	f
0	d6	90	e9	fe	cc	e1	3d	b7	16	b6	14	c2	28	fb	2c	05
1	2b	67	9a	76	2a	be	04	c3	aa	44	13	26	49	86	06	99
2	9c	42	50	f4	91	ef	98	7a	33	54	0b	43	ed	cf	ac	62
3	e4	b3	1c	a9	c9	08	e8	95	80	df	94	fa	75	8f	3f	a6
4	47	07	a7	fc	f3	73	17	ba	83	59	3c	19	e6	85	4f	a8
5	68	6b	81	b2	71	64	da	8b	f8	eb	0f	4b	70	56	9d	35
6	1e	24	0e	5e	63	58	d1	a2	25	22	7c	3b	01	21	78	87
7	d4	00	46	57	9f	d3	27	52	4c	36	02	e7	a0	c4	c8	9e
8	ea	bf	8a	d2	40	c7	38	b5	a3	f7	f2	ce	f9	61	15	a1
9	e0	ae	5d	a4	9b	34	1a	55	ad	93	32	30	f5	8c	b1	e3
a	1d	f6	e2	2e	82	66	ca	60	c0	29	23	ab	0d	53	4e	6f
b	d5	db	37	45	de	fd	8e	2f	03	ff	6a	72	6d	6c	5b	51
c	8d	1b	af	92	bb	dd	bc	7f	11	d9	5c	41	1f	10	5a	d8
d	0a	c1	31	88	a5	cd	7b	bd	2d	74	d0	12	b8	e5	b4	b0
e	89	69	97	4a	0c	96	77	7e	65	b9	f1	09	c5	6e	c6	84
f	18	f0	7d	ec	3a	dc	4d	20	79	ee	5f	3e	d7	cb	39	48

Рис. 1. Таблиця констант S-box

Лінійна заміна $L(\cdot)$ для шифрування та $L'(\cdot)$ для генерації раундових ключів обчислюється за формулами:

$$L(B) = B \oplus (B \lll 2) \oplus (B \lll 10) \oplus (B \lll 18) \oplus (B \lll 24), \quad (4)$$

$$L'(B) = B \oplus (B \lll 13) \oplus (B \lll 23) \quad (5)$$

де \oplus – операція виключного АБО (XOR); \lll – операція циклічного зсуву уліво.

Алгоритм SM4 має наступний вигляд:

1. На вхід подається 128-бітний ключ MK , який розкладається на чотири 32-бітних слова: (MK_0, MK_1, MK_2, MK_3) . Текст повідомлення або шифртексту (назвемо InitialText, IT) розбивається на блоки по 128 біт, кожний з яких розкладається на чотири 32-бітних слова: (X_0, X_1, X_2, X_3) . Якщо недостатньо байт для блоку, то такий блок заповнюється байтами нулів.

2. Генерація раундових ключів:

$$K_j = MK_j \oplus FK_j, j = 0, 1, 2, 3; \quad (6)$$

$$rk_i = K_{i+4} = K_i \oplus T'(K_{i+1} \oplus K_{i+2} \oplus K_{i+3} \oplus CK_i), i = 0, 1, \dots, 31 \quad (7)$$

де $FK = (FK_0, FK_1, FK_2, FK_3) = (a3b1bac6, 56aa3350, 677d9197, b27022dc)$,

CK : 00070e15, 1c232a31, 383f464d, 545b6269, 70777e85, 8c939aa1, a8afb6bd, c4cbd2d9, e0e7eef5, fc030a11, 181f262d, 343b4249, 50575e65, 6c737a81, 888f969d, a4abb2b9, c0c7ced5, dce3eaf1, f8ff060d, 141b2229, 30373e45, 4c535a61, 686f767d, 848b9299, a0a7aeb5, bcc3cad1, d8dfe6ed, f4fb0209, 10171e25, 2c333a41, 484f565d, 646b7279.

3. Шифрування блоку:

$$X_i = X_{i+4} = X_i \oplus T(X_{i+1} \oplus X_{i+2} \oplus X_{i+3} \oplus rk_i), i = 0, 1, \dots, 31 \quad (8)$$

Зашифрований блок має вигляд: $Y_0, Y_1, Y_2, Y_3 = (X_{35}, X_{34}, X_{33}, X_{32})$ ($Y_0, Y_1, Y_2, Y_3 = (X_{35}, X_{34}, X_{33}, X_{32})$).

Дешифрування має той самий алгоритм за винятком того, що раундові ключі застосовуються для (8) в зворотному порядку: $(rk_{31}, rk_{30}, \dots, rk_0)$ ($rk_{31}, rk_{30}, \dots, rk_0$).

Оптимізація SM4

Розглянемо функції лінійної заміни (4) і (5). Елементарні операції, які використовуються у цих функціях, – це виключне АБО (XOR) та циклічний зсув вліво.

Циклічний зсув можна представити як множення матриці зсуву (L або L') на 32-бітний вектор (рис. 2, 3).

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
1		1									1								1					1							
	1		1									1								1					1						
		1		1									1								1					1					
			1		1									1								1					1				
				1		1									1								1					1			
					1		1	1								1								1							
						1			1							1								1							
1								1		1							1								1						
	1								1		1							1								1					
		1								1		1							1								1				
			1								1		1							1								1			
				1								1		1							1								1		
					1								1									1								1	
						1								1																1	
							1																								
1								1							1								1								
	1								1							1								1							
		1								1							1								1						
			1								1							1								1					
				1								1							1								1				
					1								1							1								1			
						1								1							1								1		
							1															1								1	
													</																		

5. Програмне закриття вище вказаних файлів.

Результатом роботи програми є файли SM4_HEX_OUTPUT.txt (туди виводиться кінцевий текст у шістнадцятковому вигляді), CT_CHECK.txt (кінцевий текст у символному вигляді) та RUNTIME RESULTS.txt (результати середнього часу виконання програм).

Результати тестування

Для порівняння часу виконання оптимізованого та неоптимізованого алгоритмів за допомогою програми Runtime Compare було використано в якості вхідного параметра текстові повідомлення різних розмірів, починаючи з 17 байт і закінчуючи 777 кБ.

Обчислення проводились на процесорі AMD Ryzen 5600U, оперативна пам'ять 16 ГБ DDR4 SDRAM, операційна система Windows 11 Pro x64.

1) Дослідження на шифруванні повідомлення «HP Probook 455 G8» – 17 байт (табл. 1).

Таблиця 1

Дослідження часу виконання у дослідженні 1

Номер запуску програми	SM4	SM4 оптимізований	SM4/ SM4опт
1	0,005442	0,001882	2,8916
2	0,005306	0,001824	2,90899
3	0,005339	0,001779	3,00112
4	0,005415	0,001786	3,03191
5	0,005358	0,001859	2,88219
6	0,005460	0,001806	3,023255
7	0,005350	0,001782	3,00224
8	0,005601	0,001746	3,2079
9	0,005321	0,001802	2,95283
10	0,005575	0,001761	3,16581

2) Повідомлення розміру 8,17 кБ.

Таблиця 2

Дослідження часу виконання у дослідженні 2

Номер запуску програми	SM4	SM4 оптимізований	SM4/ SM4опт
1	1,044030	0,399793	2,61143
2	1,037570	0,399767	2,59544
3	1,036090	0,397134	2,60299
4	1,035880	0,398039	2,60246
5	1,034880	0,400610	2,58326
6	1,035320	0,398299	2,59935
7	1,034470	0,398316	2,59711
8	1,034280	0,398211	2,59732
9	1,041800	0,399316	2,60896
10	1,039400	0,399398	2,60242
Середнє SM4/ SM4опт			2,60007

3) Повідомлення розміром 777 кБ.

Таблиця 3

Дослідження часу виконання у дослідженні 3

Номер запуску програми	SM4	SM4 оптимізований	SM4/ SM4опт
1	122,768000	46,287000	2,65232
2	116,875000	56,852500	2,05575
3	121,458000	69,013800	1,75991
4	125,097000	72,430500	1,72713
5	141,115000	58,173000	2,42578
6	142,944000	59,218600	2,41384
7	129,728000	52,231900	2,48369
8	141,224000	62,063100	2,27549
9	154,018000	65,593300	2,34808
10	165,281000	57,433000	2,87781
Середнє SM4/ SM4опт			2,30198

Можна побачити, що приріст швидкості при оптимізації алгоритму SM4 у середньому складає в 2,69 рази, а це означає, що оптимізація SM4 є достатньо суттєвою і дає достатній приріст швидкості. Тому оптимізація шляхом зведення операції циклічного зсуву до прямої заміни з таблиць констант позитивно вплинула на швидкодію алгоритму SM4.

Висновки

SM4 є досить поширеним алгоритмом, який використовується і зараз. На даний момент існує велика кількість апаратних та програмних реалізацій, в яких, використовуючи особливості архітектури чи мови програмування, можна забезпечити високу швидкодію алгоритму. Авторами було здійснено оптимізацію математичного апарату SM4, в ході якої було використано особливість операції циклічного зсуву та зведено дію обчислення до прямої заміни із таблиць констант, як це було виконано в національному алгоритмі Струмок. В результаті математична оптимізація SM4 зменшила час виконання алгоритму приблизно у 2,69 рази, що означає позитивний вплив оптимізації на швидкодію алгоритму.

Список використаних джерел:

1. Задірака В.К., Терещенко А.М. (2021). Комп'ютерна арифметика багаторозрядних чисел у послідовній та паралельній моделях обчислень. Київ. 136 с.
2. Циганкова О. В. (2021). Методи підвищення швидкодії асиметричних криптосистем з використанням еліптичних кривих у формі Едвардса: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: спец. 05.13.21 – «Системи захисту інформації»; Київ 22 с.
3. Ткачук Р.А., Цуприк Г.Б., Яворський Б.І. (2012). Підвищення інформативності та швидкодії біотехнічних систем. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. № 2(24). С. 81-85.
4. Інформаційні технології. Криптографічний захист інформації. Алгоритм симетричного потокового перетворення. ДСТУ 8845:2019. Введ. 01-10-2019. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019.
5. Кузнецов О.О., Горбенко І.Д., Горбенко Ю.І., Олексійчук А.М., Тимченко В.А. (2018). Математична структура потокового шифру Струмок. *Радіотехніка*. Вип. 193. С. 17-27. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rvmnts_2018_193_4.
6. GM/T 0002-2012 SM4 Block Cipher Algorithm (English) URL: <http://www.codeofchina.com/standard/GMT0002-2012.html>.
7. Whitfield Diffie and George Ledin. SMS4 Encryption Algorithm for Wireless Networks. – URL: <https://eprint.iacr.org/2008/329.pdf>
8. LibreSSL for Windows. SourceForge. URL: <https://sourceforge.net/projects/libressl-3-2-0-for-windows/> (date of access: 04.01.2024).
9. Koch W., Schulte M. (2023). The Libgcrypt Reference Manual. 150 p.
10. GitHub: Let's build from here · GitHub. URL: https://github.com/vityak2k22/SM4_Runtime_Compare/blob/main/Config.h (date of access: 04.01.2024).
11. GitHub – vityak2k22/SM4_Runtime_Compare: Optimization of SM4 algorithm + Runtime compare between classic and optimized algorithms. GitHub. URL: https://github.com/vityak2k22/SM4_Runtime_Compare (date of access: 04.01.2024).

References:

1. Zadiraka V.K., Tereshchenko A.M. (2021). Komp'yuternaya arifmetika bol'shikh ryadov chisel v posledovatel'nykh i paralel'nykh modelyakh opisaniya. Kiyev. 136 s
2. Tsyhankova O. V. (2021). Metody shvydkoho pidvyshchennya asymetrychnoyi kryptosystemy z vykorystanniam eliptychnykh kryvykh u formi Edvardsa: avtoreferat dysertatsiyi na zdobuttya naukovooho stupenya kandydata tekhnichnykh nauk: spets. 05.13.21 – “Systemy zakhystu informatsiyi”; Kyiv. 22 s.
3. Tkachuk R.A., Tsyprik H.B., Yavors'kyi B.I. (2012). Pidvyshchennya informatyvnosti ta shvydkosti biotekhnichnykh system. Optyko-elektronni informatsiyno-enerhetychni tekhnolohiyi. № 2(24). S. 81-85.
4. *Informatsiyini tekhnolohiyi. Kryptohrafichnyy zakhyst informatsiyi. Alhorytm symetrychnoho potokovoho peretvorennya. DSTU 8845:2019.* (2019). Vved. 01-10-2019. K.: DP «UkrNDNTS».
5. Kuznetsov O.O., Horbenko I.D., Horbenko YU.I., Oleksiychuk A.M., Tymchenko V.A. (2018). *Matematychna struktura potokovoho shyfru Strumok. Radiotekhnika.* Vyp. 193. S. 17-27. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rvmnts_2018_193_4.
6. GM/T 0002-2012 SM4 Block Cipher Algorithm (English) URL: <http://www.codeofchina.com/standard/GMT0002-2012.html>.
7. Whitfield Diffie and George Ledin. SMS4 Encryption Algorithm for Wireless Networks. – URL: <https://eprint.iacr.org/2008/329.pdf>
8. LibreSSL for Windows. SourceForge. URL: <https://sourceforge.net/projects/libressl-3-2-0-for-windows/> (date of access: 04.01.2024).

-
9. Koch W., Schulte M. (2023). The Libgcrypt Reference Manual. 150 p.
 10. GitHub: Let's build from here · GitHub. URL: https://github.com/vityak2k22/SM4_Runtime_Compare/blob/main/Config.h (date of access: 04.01.2024).
 11. GitHub – vityak2k22/SM4_Runtime_Compare: Optimization of SM4 algorithm + Runtime compare between classic and optimized algorithms. GitHub. URL: https://github.com/vityak2k22/SM4_Runtime_Compare (date of access: 04.01.2024).

Прокопович-Ткаченко Д. І., кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-6590-3898

ЕМЕРДЖЕНТНО-АДАПТИВНИЙ МЕТОД ОЦІНКИ ВПЛИВУ ПОСТКВАНТОВОГО СЕРЕДОВИЩА НА ІНФОРМАЦІЙНУ БЕЗПЕКУ ДЕРЖАВИ

У статті запропоновано емерджентно-адаптивний метод для оцінки впливу постквантового середовища на інформаційну безпеку держави, що ґрунтується на принципах самоорганізації та синергії. Метод спрямований на забезпечення ефективного реагування на загрози, пов'язані з розвитком квантових обчислень, які можуть порушити існуючі криптографічні протоколи, такі як RSA та ECC. Розглянуто ключову роль штучного інтелекту в аналізі, прогнозуванні та динамічній адаптації захисних систем.

При моделюванні атак проводяться симуляції впливу квантових обчислень на криптографічні системи, зокрема оцінюється стійкість ключових протоколів до атак алгоритмів Шора та Гровера. На етапі адаптації впроваджуються квантово стійкі криптографічні рішення, такі як решіткові алгоритми, кодові схеми та геши-функції, а також проводиться моніторинг їхньої ефективності.

Далі виконується аналіз загроз, який фокусується на дослідженні можливостей квантових обчислень, здатних порушити сучасні криптографічні системи. Наступним кроком є оцінка вразливостей, під час якої ідентифікуються використовувані криптографічні алгоритми, такі як RSA та ECC, і аналізується їхня стійкість до атак квантовими алгоритмами.

Після цього виконується аналіз критичних точок і протоколів зв'язку, що охоплює оцінку стійкості таких протоколів, як TLS/SSL, IPsec, VPN, до можливих квантових атак. Наступним етапом є симуляція атак, яка передбачає моделювання квантових атак для оцінки ймовірності їхнього успіху. Завершальним етапом є розробка рішень постквантової безпеки, що включає вибір та впровадження нових криптографічних алгоритмів, стійких до квантових атак, та їхню інтеграцію в існуючі системи. Усі етапи взаємопов'язані та забезпечують динамічну адаптацію системи до нових викликів.

Доведено, що запропонований підхід забезпечує підвищену стійкість інформаційних систем до нових загроз завдяки інтеграції класичних та постквантових протоколів. Особливу увагу приділено синергії різних компонентів безпеки, що дозволяє створювати адаптивні та самоорганізовані системи. Перспективи подальших досліджень включають розробку моделей емерджентності, інтеграцію постквантових рішень у державні інформаційні системи та впровадження міждисциплінарного підходу до забезпечення кібербезпеки.

Ключові слова: постквантове середовище, емерджентність, кібербезпека, квантові обчислення, адаптація.

Prokopovych-Tkachenko D. I. Emergent-adaptive method of assessing the impact of the post-quantum environment on the information security of the state

The article proposes an emergent-adaptive method for assessing the impact of the post-quantum environment on the state's information security, based on the principles of self-organization and synergy. The method aims to ensure effective responses to threats associated with the development of quantum computing, which may compromise existing cryptographic protocols such as RSA and ECC. The critical role of artificial intelligence in analyzing, forecasting, and dynamically adapting defensive systems is highlighted.

During attack modeling, simulations are conducted to evaluate the impact of quantum computing on cryptographic systems, specifically assessing the resilience of key protocols against attacks by Shor's and Grover's algorithms. At the adaptation stage, quantum-resistant cryptographic solutions such as lattice-based algorithms, code-based schemes, and hash functions are implemented, and their effectiveness is monitored.

This is followed by a threat analysis that focuses on exploring the capabilities of quantum computing to break current cryptographic systems. The next step is a vulnerability assessment that identifies the cryptographic algorithms used, such as RSA and ECC, and analyzes their resistance to quantum attacks.

This is followed by an analysis of critical points and communication protocols, which includes assessing the resistance of protocols such as TLS/SSL, IPsec, VPN to possible quantum attacks. The next stage is attack simulation, which involves modeling quantum attacks to assess the likelihood of their success. The final stage is the development of post-quantum security solutions, which includes the selection and implementation of new cryptographic algorithms that are resistant to quantum attacks and their integration into existing systems. All stages are interconnected and ensure the dynamic adaptation of the system to new challenges.

It has been proven that the proposed approach enhances the resilience of information systems to new threats by integrating classical and post-quantum protocols. Particular attention is given to the synergy of various security components, enabling the creation of adaptive and self-organized systems. Prospects for further research include the development of emergent models, the integration of post-quantum solutions into state information systems, and the adoption of an interdisciplinary approach to cybersecurity.

Key words: *post-quantum environment, emergence, cybersecurity, quantum computing, adaptation.*

Вступ. Розвиток квантових обчислень створює нові виклики для сучасних систем інформаційної безпеки, що вимагає перегляду підходів до їх побудови та адаптації. Постквантове середовище характеризується взаємодією двох складних систем – квантових технологій та державної системи інформаційної безпеки. Ці системи мають різну природу, структуру і динаміку, що ускладнює їх інтеграцію та потребує розробки нових адаптивних методів.

Квантові технології відкривають нові можливості, такі як створення стійких до зламів каналів зв'язку, однак одночасно створюють і ризики, пов'язані зі зростанням потужності квантових алгоритмів для аналізу та компрометації даних. Інформаційна безпека держави, у свою чергу, має забезпечувати стійкість національної інфраструктури, включаючи урядові комунікації, управління критично важливими ресурсами та захист конфіденційної інформації.

Для цього необхідно впроваджувати інноваційні рішення, які дозволяють гнучко адаптуватися до динамічних змін у технологічному ландшафті. Особливу увагу слід приділити адаптації складних систем інформаційної безпеки до викликів, які супроводжують впровадження квантових технологій. Цей процес потребує розробки методів, що враховують складність обох систем, їхню взаємозалежність та необхідність функціонування в умовах невизначеності. Йдеться про створення моделей, які забезпечать ефективний перехід до квантово-стійкої архітектури з урахуванням сучасних загроз.

Зокрема, перспективним напрямом є розробка багаторівневих адаптивних систем, які поєднують квантові та традиційні підходи, забезпечуючи їх гнучкість, стійкість і надійність. Це включає механізми прогнозування загроз за допомогою штучного інтелекту, автоматизацію процесів оцінки ризиків та інтеграцію технологій, здатних працювати у складному динамічному середовищі. Такий підхід дозволить адаптувати державні системи інформаційної безпеки до нових умов, забезпечуючи їхню стійкість і ефективність у постквантовому технологічному середовищі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток квантових обчислень створює нові загрози для сучасних систем інформаційної безпеки, що викликає потребу у впровадженні квантово-стійких рішень. Квантові алгоритми, такі як алгоритм Шора, мають здатність порушувати основи криптографічних протоколів, зокрема RSA та ECC, що підкреслює необхідність впровадження нових стандартів безпеки. Сугіас et al. (2024) наголошують на важливості поєднання класичних і квантових протоколів, таких як квантовий розподіл ключів (QKD), для створення захищених каналів зв'язку.

Однією з ключових проблем є вплив квантових обчислень на системи Інтернету речей (IoT). Аломагі і Кумар (2024) відзначають, що хоча квантові обчислення сприяють прискоренню обробки даних, вони також створюють нові загрози для безпеки IoT-систем. У відповідь на це запропоновано підходи, які інтегрують емерджентні властивості для забезпечення стійкості таких систем.

Анантрай et al. (2023) пропонують системний підхід до інформаційної безпеки, який базується на принципах емерджентності. Цей підхід дозволяє створювати адаптивні моделі аналізу ризиків та захисту даних, які здатні до самоорганізації. Особливу увагу приділено інтеграції адаптивних технологій у постквантове середовище для побудови саморегульованих систем захисту.

Принципи емерджентності стають важливими в контексті квантової криптографії. Сугіас et al. (2024) підкреслюють, що взаємодія різних компонентів, таких як поєднання класичних і квантових підходів, сприяє утворенню властивостей, що перевищують можливості окремих елементів. Лара-Ніно et al. (2022) акцентують увагу на необхідності впровадження квантово-стійких алгоритмів, які базуються на ґратках і ґеш-функціях, як надійного механізму захисту в державному секторі.

Крім того, синергія між різними методами захисту підсилює емерджентні властивості систем. Аломагі і Кумар (2024) розглядають комбіноване використання шифрування і багаторівневого контролю доступу як приклад такого підходу. Це забезпечує більш стійкий захист в умовах динамічного середовища загроз. Висновки Анантрай et al. (2023) підкреслюють важливість дослідів цих методів. Інтеграція таких підходів з активним моніторингом та адаптивними технологіями стає ключовим напрямом для майбутнього інформаційної безпеки.

Постановка проблеми. Постквантові обчислення створюють нові виклики для забезпечення інформаційної безпеки, особливо в контексті державних інформаційних систем та критично важливих інфраструктур. Зі зростанням потужності квантових технологій існуючі підходи до забезпечення захисту даних стають дедалі менш ефективними. Вразливість сучасних криптографічних систем потребує не лише впровадження нових квантово-стійких алгоритмів, але й переосмислення методології виявлення загроз і побудови адаптивних систем безпеки.

Ключовою проблемою є те, що традиційні моделі кіберзахисту базуються на статичних методах виявлення загроз, які не відповідають динамічному та швидко змінюваному ландшафту сучасних атак. Постквантове середовище вимагає інноваційних підходів, які враховують можливості квантових обчислень для аналізу, прогнозування та нейтралізації ризиків у реальному часі. Це стосується не лише розробки нових технологій, але й створення самонавчальних систем, здатних адаптуватися до нових типів загроз без втручання людини.

У державному контексті це питання набуває критичного значення, оскільки від інформаційної безпеки залежить збереження конфіденційності, цілісності й доступності даних, які підтримують функціонування урядових структур, національної безпеки та критичних секторів економіки. Загрози постквантового середовища охоплюють не лише прямий компроміс даних, а й нові, складні вектори атак, які можуть залишатися непоміченими в рамках існуючих систем моніторингу.

Необхідно розробити нові підходи до виявлення загроз, які ґрунтуються на принципах адаптивності та емерджентності. Адаптивність дозволяє системам реагувати на непередбачувані ризики, тоді як емерджентність створює нові властивості через взаємодію компонентів системи. Інтеграція цих підходів забезпечить можливість саморегулювання, активного моніторингу та швидкого реагування на невідомі загрози. Таким чином, постквантове середовище вимагає трансформації підходів до інформаційної безпеки шляхом впровадження інноваційних методів аналізу ризиків, адаптивних моделей захисту та системного управління загрозами, здатних забезпечити стійкість у новій технологічній реальності.

Мета дослідження. Оцінка впливу постквантового середовища на інформаційну безпеку держави на підставі запропонованого емерджентно-адаптивний методу, що ґрунтується на принципах самоорганізації та синергії.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час реалізації запропонованого методу передбачається наступна поетапність:

1. **Ідентифікація загроз:** на цьому етапі проводиться аналіз векторів атак, які базуються на можливостях постквантових технологій. Особливу увагу приділяють вразливостям сучасних криптографічних протоколів (RSA, ECC, DSA) до алгоритмів Шора чи Гровера.

2. **Моделювання атак:** створюються симуляції квантових атак, що дають змогу оцінити ймовірність успіху зловмисника, а також розробити можливі сценарії атак. Це включає аналіз потенційного впливу компрометації на ключові системи державної інфраструктур

3. **Адаптація безпекових політик:** впроваджуються постквантові алгоритми (наприклад, решіткові схеми, кодові алгоритми або геш-функції). Після інтеграції алгоритмів проводиться тестування оновлених систем, моніторинг ефективності захисту та постійна адаптація політик до нових загроз, також відповідну сегментацію поетапності (див. рис. 1).



Рис. 1. Оцінка постквантової безпеки

Схема, зображена на рисунку 1, відображає багатоступеневий алгоритм оцінки впливу постквантового середовища на інформаційну безпеку. На першому етапі здійснюється ініціалізація аналізу безпеки, що передбачає проведення систематичного огляду існуючих механізмів захисту для формування бази подальшого аналізу.

Далі виконується аналіз загроз, який фокусується на дослідженні можливостей квантових обчислень, здатних порушити сучасні криптографічні системи. Наступним кроком є оцінка вразливостей, під час якої ідентифікуються використовувані криптографічні алгоритми, такі як RSA та ECC, і аналізується їхня стійкість до атак квантовими алгоритмами.

Після цього виконується аналіз критичних точок і протоколів зв'язку, що охоплює оцінку стійкості таких протоколів, як TLS/SSL, IPsec, VPN, до можливих квантових атак. Наступним етапом є симуляція атак, яка передбачає моделювання квантових атак для оцінки ймовірності їхнього успіху. Завершальним етапом є розробка рішень постквантової безпеки, що включає вибір та впровадження нових криптографічних алгоритмів, стійких до квантових атак, та їхню інтеграцію в існуючі системи. Усі етапи взаємопов'язані та забезпечують динамічну адаптацію системи до нових викликів. Використовуючи поетапність сформуємо спрощений алгоритм у вигляді схеми (див. рис. 2), яка візуалізує процеси та взаємозв'язки, що реалізує запропонований метод.



Рис. 2. Відображення схеми у вигляді алгоритму реалізації емерджентно-адаптивного методу

Розглянемо питання адаптивності, що пов'язано з використанням штучного інтелекту у забезпеченні функції адаптивності цього методу.

Штучний інтелект (ШІ) використовується у адаптивному процесі емерджентно-адаптивного методу, оскільки він забезпечує динамічну інтеграцію аналізу, прогнозування та адаптації складних систем у відповідь на загрози або зміни середовища. ШІ здатний виявляти емерджентні властивості системи, які виникають із взаємодії її елементів, і використовувати ці властивості для підвищення ефективності управління ризиками.

У цьому контексті важливу роль відіграють нейронні мережі, які є ключовим компонентом ШІ для обробки великих обсягів даних, аналізу складних закономірностей та забезпечення адаптивності. Глибокі нейронні мережі (Deep Neural Networks, DNN) забезпечують здатність системи розпізнавати складні та нелінійні залежності між різними параметрами в умовах динамічного середовища.

Наприклад, у кібербезпеці нейронні мережі використовуються для аналізу великих масивів даних, таких як трафік мережі або поведінка користувачів, для виявлення аномалій, які можуть свідчити про потенційні загрози. Глибокі нейронні мережі також можуть прогнозувати ймовірність успішних атак, адаптуючи систему захисту до нових умов ще до виникнення проблеми. Нейронні мережі дозволяють створювати автономні адаптивні системи, які самостійно вивчають динаміку середовища. Наприклад, рекурентні нейронні мережі (RNN) особливо ефективні для аналізу часових послідовностей даних, що дозволяє прогнозувати майбутні події, засновані на історичній інформації, від поведінки зловмисника до розвитку загрози.

Конволюційні нейронні мережі (CNN), у свою чергу, можуть бути корисними для аналізу структурованих даних, таких як пакети мережевого трафіку, виявляючи характерні патерни або відхилення від норми. Завдяки цим властивостям нейронні мережі стають основою для створення адаптивних систем, які можуть виявляти раніше невідомі загрози, створювати нові механізми захисту та забезпечувати проактивне управління ризиками.

Водночас вони підвищують рівень інтеграції між різними компонентами системи, такими як шифрування, аналіз аномалій і управління доступом, сприяючи створенню єдиного адаптивного механізму захисту. Таким чином, використання нейронних мереж у рамках емерджентно-адаптивного методу забезпечує не лише підвищення стійкості систем до динамічних змін, але й їхню здатність самостійно еволюціонувати для реагування на нові виклики.

ШІ є фундаментальною частиною емерджентно-адаптивного підходу, оскільки він забезпечує динамічну інтеграцію аналізу, прогнозування та адаптації складних систем до нових загроз. ШІ дозволяє автоматизувати процеси виявлення вразливостей, моделювання атак і розробки захисних механізмів. Завдяки можливостям нейронних мереж, таких як глибокі нейронні мережі (DNN) і рекурентні нейронні мережі (RNN), ШІ здатний аналізувати великі обсяги даних, виявляючи складні закономірності та нелінійні залежності.

Застосування нейронних мереж у кібербезпеці включає аналіз аномалій, де ШІ здатний виявляти аномалії в мережевому трафіку, що можуть вказувати на потенційні загрози, аналізуючи мільйони пакетів даних у реальному часі. Прогнозування атак здійснюється за допомогою використання історичних даних для моделювання поведінки зловмисників та прогнозування нових сценаріїв атак.

Автоматична адаптація дозволяє системам самостійно коригувати політики безпеки залежно від змін у середовищі, наприклад, активуючи нові алгоритми шифрування або обмежуючи доступ до критичних ресурсів. Самонавчання забезпечує вдосконалення систем завдяки використанню технологій глибокого навчання, підвищуючи їхню стійкість до загроз, навіть тих, які раніше не існували.

Емерджентно-адаптивний метод базується на моделюванні загроз, створенні агентно-орієнтованих моделей для оцінки можливих впливів квантових атак на інформаційні системи. Оцінка вразливостей зосереджується на аналізі слабких місць у криптографічних системах, особливо тих, які базуються на класичних алгоритмах шифрування. Динамічна адаптація передбачає розробку механізмів реального часу для перемикання між класичними і постквантовими криптографічними протоколами.

Емерджентний аналіз ризиків вивчає каскадні ефекти компрометації однієї частини системи на всю інфраструктуру. Прогнозування майбутніх викликів включає форсайт-аналіз із використанням штучного інтелекту для передбачення нових загроз та довгострокового планування безпеки. Інтеграція синергії поєднує існуючі технології безпеки з новітніми постквантовими рішеннями для підвищення ефективності захисту.

Приклад можливого використання методу – найбільш вразлива у постквантовому середовищі система з високим ступенем емерджентності, як фінансова система (див. рис. 3). У фінансовій системі емерджентно-адаптивний метод може бути застосований для моделювання атак квантового комп'ютера, аналізу сценаріїв компрометації цифрових підписів у транзакціях, оцінки стійкості протоколів до атак квантовими алгоритмами, впровадження гібридного захисту через інтеграцію класичних і постквантових криптографічних рішень.

Також він дозволяє аналізувати ризики, вивчаючи вплив компрометації одного компонента на всю систему, і здійснювати довгострокове прогнозування, оцінюючи вплив квантових технологій через 5–10 років на фінансові транзакції та безпеку даних.



Рис. 3. Схема процесу застосування емерджентно-адаптивного методу в контексті фінансової системи для забезпечення інформаційної безпеки в умовах квантових загроз

Схема, представлена на рисунку 3, відображає процес застосування емерджентно-адаптивного методу в контексті фінансової системи для забезпечення інформаційної безпеки в умовах квантових загроз. Вона структурована у п'ять ключових компонентів, які послідовно та взаємопов'язано реалізують завдання оцінки ризиків, моделювання сценаріїв атак, впровадження криптографічних рішень та довгострокового прогнозування.

Перший елемент – моделювання атак з використанням квантових складних систем – охоплює аналіз можливих сценаріїв компрометації цифрових підписів у транзакціях. На цьому етапі створюються симуляції для оцінки потенційної загрози квантових обчислень на криптографічні механізми, які використовуються у фінансових системах.

Другий елемент, оцінка стійкості протоколів, передбачає тестування існуючих протоколів безпеки на предмет їхньої вразливості до атак з використанням квантових алгоритмів. Цей етап дозволяє визначити слабкі місця в системі шифрування та комунікацій.

Третій компонент, впровадження гібридного захисту, зосереджений на інтеграції класичних та постквантових криптографічних рішень. Він передбачає використання інноваційних схем шифрування, таких як решіткові алгоритми або кодові конструкції, для підвищення стійкості системи до новітніх загроз.

Четвертий елемент, аналіз ризиків, спрямований на вивчення впливу компрометації одного компонента на загальну інфраструктуру системи. Тут враховуються каскадні ефекти та розробляються механізми для зменшення можливого негативного впливу на ключові процеси.

П'ятий компонент – довгострокове прогнозування – забезпечує оцінку впливу квантових технологій на фінансову безпеку протягом 5–10 років. Цей етап включає форсайт-аналіз і розробку стратегій, які дозволяють адаптувати систему до майбутніх викликів.

Логічні зв'язки між компонентами схеми демонструють їхню взаємозалежність. Моделювання атак формує основу для оцінки стійкості протоколів, результати якої стають основою для інтеграції гібридного захисту. Гібридні рішення сприяють мінімізації ризиків, що, у свою чергу, інформує довгострокове прогнозування. Прогнозування ж генерує нові сценарії загроз, які знову враховуються при моделюванні.

Таким чином, представлена схема є інтегрованою структурою, яка забезпечує адаптивний підхід до захисту фінансової системи, дозволяючи не лише протистояти сучасним загрозам, але й передбачати виклики, спричинені еволюцією квантових технологій.

Математичне представлення схеми з урахуванням оцінки постквантового впливу на інформаційну безпеку фінансової системи можна застосувати для відображення взаємозв'язку між етапами моделювання, оцінки ризиків, впровадження криптографічних рішень та довгострокового прогнозування.

Позначимо основні компоненти схеми як змінні:

$M(t)$ – функція моделювання атак квантового комп'ютера на момент часу t . Вона враховує сценарії компрометації цифрових підписів.

$R(t)$ – функція оцінки стійкості протоколів, яка залежить від результатів моделювання та відображає поточну вразливість системи.

$H(t)$ – функція гібридного захисту, яка відображає ефективність інтеграції класичних і постквантових криптографічних рішень.

$V(t)$ – функція аналізу ризиків, що враховує можливі каскадні ефекти компрометації компонентів системи.

$F(t)$ – функція довгострокового прогнозування, яка оцінює вплив квантових технологій у перспективі.

Кожна функція залежить від попередніх етапів, що формує систему динамічних взаємозв'язків. Математична модель може бути представлена таким чином:

$$M(t) = f_1(D, P, K), \quad (1)$$

де D – дані про існуючі протоколи;

P – поточні параметри криптографії,

K – обчислювальна потужність квантових алгоритмів.

$$R(t) = f_2(M(t), S), \quad (2)$$

де S – набір специфічних параметрів, що характеризують криптографічну стійкість системи.

$$H(t) = f_3(R(t), C), \quad (3)$$

де C – набір криптографічних рішень, що включає класичні та постквантові методи.

$$V(t) = f_4(H(t), L), \quad (4)$$

де L – ймовірність каскадних збоїв у системі.

$$F(t) = f_5(V(t), Q), \quad (5)$$

де Q – прогнозований розвиток квантових обчислень у майбутньому.

Для оцінки загальної користі (U) від впровадження постквантового підходу враховується покращення всіх компонентів:

$$U = \int_{t_0}^{t_f} [\alpha_1 M(t) + \alpha_2 R(t) + \alpha_3 H(t) + \alpha_4 V(t) + \alpha_5 F(t)] dt, \quad (6)$$

де $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ – вагові коефіцієнти, що визначають значущість кожного етапу в загальному контексті інформаційної безпеки.

Ця модель дозволяє оцінювати вплив кожного етапу процесу на загальну стійкість фінансової системи до постквантових загроз. Інтеграція показує сукупний ефект від застосування емерджентно-адаптивного методу у визначений проміжок часу. Вагові коефіцієнти можуть коригуватися залежно від пріоритетів захисту та специфіки середовища.

Майбутній розвиток емерджентно-адаптивного підходу включає створення формалізованих моделей емерджентності для прогнозування нових властивостей систем у квантовому середовищі, використання штучного інтелекту для форсайт-аналізу і довгострокового планування безпеки, інтеграцію квантових і класичних систем для забезпечення максимальної стійкості інформаційних систем. Передбачаються міждисциплінарні дослідження, які об'єднують криптографію, системний аналіз, квантові обчислення і кібербезпеку.

Емерджентно-адаптивний метод є перспективним інструментом для забезпечення інформаційної безпеки в умовах зростаючих викликів, спричинених розвитком квантових технологій. Він базується на принципах взаємодії складних систем, нових властивостях, що виникають завдяки їхній взаємодії, і здатності систем до адаптації та еволюції в умовах динамічних змін. Цей метод пропонує не лише виявляти і нейтралізувати існуючі загрози, а й прогнозувати нові сценарії атак, враховуючи непередбачувані наслідки впровадження квантових обчислень. Інтеграція постквантових технологій, динамічна адаптація до змін і активне використання штучного інтелекту для аналізу загроз роблять цей метод принципово новим у контексті державної інформаційної безпеки.

Основні результати. Основні результати роботи демонструють інноваційний підхід до формування політики інформаційної безпеки держави в умовах переходу на квантові технології. Розроблено алгоритм, що забезпечує багатоступеневий аналіз вразливостей, включаючи оцінку ризиків у реальному часі та впровадження новітніх рішень для підвищення стійкості інформаційних систем. Запропоновано використання емерджентних властивостей систем для створення самоадаптивних механізмів захисту, які здатні реагувати на нові загрози без необхідності зовнішнього втручання.

Особливу увагу приділено виявленню ефекту від інтеграції класичних і постквантових криптографічних протоколів, що дозволяє посилити захист даних за рахунок поєднання переваг обох підходів. Таким чином, впровадження запропонованого методу забезпечує динамічне та адаптивне реагування на виклики постквантового середовища, що є критично важливим для підтримки національної безпеки та захисту критичних інформаційних систем у сучасних умовах.

Емерджентний підхід, інтегрований у методики забезпечення інформаційної безпеки, відкриває нові перспективи для підвищення стійкості державних інформаційних систем в умовах переходу до квантових технологій. Його унікальність полягає у врахуванні складної взаємодії між компонентами системи, що дозволяє утворювати нові властивості для адаптації до непередбачуваних загроз. Застосування ШІ, зокрема нейронних мереж, не тільки підвищує здатність до аналізу великих обсягів даних, але й забезпечує автоматизоване прогнозування та динамічну адаптацію систем безпеки в режимі реального часу.

Новітні напрями розвитку цієї методики включають інтеграцію квантових обчислень для оптимізації механізмів виявлення загроз. Наприклад, квантові алгоритми здатні прискорити процеси ідентифікації аномалій у мережевому трафіку або виявлення складних моделей атак, які можуть залишатися невидимими для традиційних систем моніторингу. Перспективним є також поєднання емерджентних властивостей із гібридними моделями безпеки, де класичні, квантові та постквантові підходи синергетично працюють для створення багатоетапних бар'єрів проти атак.

Додатково перспективним напрямом є використання децентралізованих архітектур, таких як блокчейн, для забезпечення довіри у постквантових середовищах. Емерджентний підхід у цьому контексті може допомогти побудувати системи, де автономні елементи співпрацюють, забезпечуючи високу стійкість до спроб порушення цілісності даних.

Інший важливий вектор розвитку – впровадження емерджентних моделей в системи раннього попередження. Використовуючи штучний інтелект для моделювання потенційних сценаріїв атак, системи можуть прогнозувати нові типи загроз, базуючись на взаємодії різних компонентів кіберсередовища. Це дозволить розробляти не лише реактивні, а й проактивні стратегії захисту.

Подальше вдосконалення методики може включати інтеграцію з концепціями «цифрових двійників», які дозволяють симулювати функціонування системи в реальному часі, відстежуючи та прогнозуючи її вразливості. Це забезпечує ще більш високу адаптивність і здатність до самоорганізації, що є ключовим для кіберзахисту в умовах невизначеності.

Таким чином, запропонована методика має широкий спектр перспективних напрямів розвитку, що робить її одним із найбільш інноваційних підходів до забезпечення інформаційної безпеки в епоху квантових технологій.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Основною перевагою методу є здатність з його допомогою прогнозувати майбутні ризики, що досягається через використання моделювання сценаріїв атак у постквантовому середовищі, а також можливість динамічної адаптації до нових викликів. Це дозволяє забезпечити не лише захист від відомих атак, але й створення системи, здатної до самонавчання і формування нових механізмів захисту.

На першому етапі проводиться аналіз потенційних векторів атак і вразливостей у державних інформаційних системах, зокрема оцінюється стійкість існуючих комунікаційних протоколів до квантових атак.

На другому етапі моделювання атак включає використання симуляцій квантових обчислень для оцінки ймовірності компрометації ключових компонентів системи.

Третій етап передбачає впровадження постквантових криптографічних рішень, таких як решіткові схеми, кодові алгоритми або багатоваріантні функції, з подальшим тестуванням і адаптацією до нових загроз.

Емерджентність у цьому підході проявляється у створенні нових властивостей системи, які неможливо звести до суми її компонентів, наприклад, формування самоорганізованих механізмів захисту. Адаптивність забезпечує динамічну перебудову систем залежно від змін у середовищі, включаючи активацію нових захисних алгоритмів або обмеження доступу до критично важливих ресурсів.

Інноваційність емерджентно-адаптивного методу полягає у використанні міждисциплінарного підходу, який об'єднує знання з квантових обчислень, кібербезпеки та системного аналізу. Він пропонує не лише технологічні, але й організаційні рішення, які включають створення стандартів постквантової безпеки, розробку довгострокових стратегій захисту та підготовку фахівців у цій галузі.

Майбутній розвиток цього методу передбачає створення формалізованих моделей емерджентності, які дозволять точніше оцінювати взаємодію компонентів системи і прогнозувати нові загрози. Використання штучного інтелекту для форсайт-аналізу і довгострокового планування також стане ключовим напрямом досліджень. Інтеграція постквантових криптографічних рішень у сучасні мережі, хмарні сервіси, IoT та VPN забезпечить ефективний захист критичних інформаційних систем.

Емерджентно-адаптивний підхід формує нову парадигму інформаційної безпеки, яка забезпечує довгострокову стійкість до викликів квантової епохи, зберігаючи цілісність, конфіденційність і доступність інформації в умовах постійних технологічних змін. Він відкриває нові можливості для міждисциплінарних досліджень і міжнародного співробітництва, створюючи фундамент для інтеграції новітніх технологій у державні системи захисту.

Список використаних джерел:

1. Allgyer, W., White, T., & Youssef, T. A. Securing the Future: A Comprehensive Review of Post-Quantum Cryptography and Emerging Algorithms. *Proceedings of IEEE SoutheastCon*. 2024. DOI: 10.1109/southeastcon52093.2024.10500031. URL: <https://ircommons.uwf.edu/esploro/outputs/presentation/Securing-the-Future-A-Comprehensive-Review/99380555884006600>

2. Alomari, A., & Kumar, S. Securing IoT systems in a post-quantum environment: Vulnerabilities, attacks, and possible solutions. *Internet of Things*. DOI: 10.1016/j.iot.2024.101132. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S254266052400074X>

-
3. Anantraj, I., Umarani, B., Karpagavalli, C., Usharani, C., & Lakshmi, S. J. Quantum Computing's Double-Edged Sword: Unravelling the Vulnerabilities in Quantum Key Distribution for Enhanced Network Security. *Proceedings of IEEE NELEX*. 2023. DOI: 10.1109/nelex59773.2023.10420896. URL: https://www.researchgate.net/publication/378277590_Quantum_Computing's_Double-Edged_Sword_Unravelling_the_Vulnerabilities_in_Quantum_Key_Distribution_for_Enhanced_Network_Security
 4. Cyriac, R., Eswaran, S., & Selvarajan, S. Quantum Computing in Cryptographic Systems. *Journal ResearchGate Article*. 2024. DOI: 10.69942/1920184/20240101/03. URL: https://www.researchgate.net/publication/382165513_Quantum_Computing_in_Cryptographic_Systems
 5. Lara-Nino, C. A., Diaz-Perez, A., & Morales-Sandoval, M. Post-Quantum Cryptography for Embedded Systems. *Mexican International Conference on Computer Science*. 2022. DOI: 10.1109/ENC56672.2022.9882904. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9882904>

References:

1. Allgyer, W., White, T., & Youssef, T. A. (2024). Securing the Future: A Comprehensive Review of Post-Quantum Cryptography and Emerging Algorithms. *Proceedings of IEEE SoutheastCon*. DOI: 10.1109/southeastcon52093.2024.10500031
2. Alomari, A., & Kumar, S. (2024). Securing IoT systems in a post-quantum environment: Vulnerabilities, attacks, and possible solutions. *Internet of Things*. DOI: 10.1016/j.iot.2024.101132
3. Anantraj, I., Umarani, B., Karpagavalli, C., Usharani, C., & Lakshmi, S. J. (2023). Quantum Computing's Double-Edged Sword: Unravelling the Vulnerabilities in Quantum Key Distribution for Enhanced Network Security. *Proceedings of IEEE NELEX*. DOI: 10.1109/nelex59773.2023.10420896
4. Cyriac, R., Eswaran, S., & Selvarajan, S. (2024). Quantum Computing in Cryptographic Systems. *Journal Article*. DOI: 10.69942/1920184/20240101/03
5. Lara-Nino, C.A., Diaz-Perez, A., & Morales-Sandoval, M. (2022). Post-Quantum Cryptography for Embedded Systems. *Mexican International Conference on Computer Science*. DOI: 10.1109/ENC56672.2022.9882904

Рибальченко Л. В., кандидат економічних наук доцент,
доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-0413-8296

Габорець О. А., доктор філософії, доцент кафедри
оперативно-розшукової діяльності та інформаційної безпеки
факультету № 3 Донецького державного університету
внутрішніх справ
ORCID: 0000-0001-7791-6795

Прокопович-Ткаченко Д. І., завідувач кафедри кібербезпеки
та інформаційних технологій
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-6590-3898

КІБЕРСТІЙКІСТЬ: ГЛОБАЛЬНІ ЗАГРОЗИ ТА НАЦІОНАЛЬНІ СТРАТЕГІЇ КІБЕРЗАХИСТУ

Стаття присвячена питанням захисту підприємств, установ та організацій від кіберзлочинності, яка створює глобальні загрози для національної безпеки. Розглядаються особливості застосування ефективних методів управління ризиками, проведення ретельного аналізу потенційних загроз та здійснення моніторингу рівня кібербезпеки.

Широке застосування інформаційних технологій призводить до численних злочинів та виникнення нових видів загроз, які ґрунтуються на використанні різних засобів, методів та елементів впливу на свідомість людини. Формування єдиного глобального інформаційного простору дало можливість кожній людині отримати доступ до інформації з різних частин світу.

Доведено, що дистанційне керування бізнесом, управління власними активами, проведення транзакції, спричиняє для злочинців нові засоби втручання до персональних даних громадян з метою їх заволодіння.

Метою статті є дослідження глобального інформаційного простору, який став безмежним місцем та інструментом для злочинів. Інформаційно-комунікаційні системи стали основним знаряддям злочину.

Досліджено, що застосування незаконних технічних засобів, створення вірусів, спамів, фішингових атак та інших засобів, дали кіберзлочинцям можливість отримати доступ до конфіденційної інформації, баз даних, інформації з обмеженим доступом, платіжних карток, банківських рахунків та автоматизованих систем управління із метою викрадення та заволодіння даними призводить до прояву різних форм шахрайства.

Доведено, що крадіжка персональних даних та комерційної інформації з метою заволодіння коштами клієнтів банку, навмисне пошкодження і псування інформаційних систем та комунікацій є невеликим переліком зловмисний дій сучасних шахраїв, які призводять до збитків підприємства, установи, організації та громадян.

З'ясовано, що застосування різних атак на інтернет-ресурси із використанням сучасних інформаційних технологій, які стрімко розвиваються, стали підґрунтям для кіберзлочинців щодо нанесення шкоди та збитків критичній інфраструктурі країни.

Встановлено, що в умовах війни кількість кіберзлочинів зростає в рази і здійснюється для дестабілізації держави, нанесення збитків, виведення з ладу обладнання, техніки та технологій, зв'язку та комунікацій. Хакерські атаки здатні здійснити контроль над особистими даними, базами даних великих підприємств та установ, стати загрозою для витоку даних та пошкодження мережі.

Ключові слова: кібератаки, шахраї, критична інфраструктура, інформаційні технології, спами.

Rybalchenko L. V., Haborets O. A., Prokopovych-Tkachenko D. I., Cyber resilience: global threats and national cyber defense strategies

The widespread use of information technologies leads to numerous crimes and the emergence of new types of threats based on the use of various means, methods and elements of influence on human consciousness. The formation of a single global information space has enabled everyone to access information from different parts of the world.

Remote management of business, management of personal assets, conducting transactions, provides criminals with new means of interfering with personal data of citizens in order to obtain them.

The purpose of the article is to study the global information space, which has become a limitless place and tool for crime. Information and communication systems have become the main instrument of crime.

The use of illegal technical means, creation of viruses, spam, phishing attacks and other means have enabled cybercriminals to gain access to confidential information, databases, restricted information, payment cards, bank accounts and automated management systems in order to steal and take possession of data, resulting in various forms of fraud.

The theft of personal data and commercial information to seize the funds of bank customers, deliberate damage and corruption of information systems and communications is a small list of malicious actions of modern fraudsters that cause losses to enterprises, institutions, organizations and individuals.

The use of various attacks on Internet resources with the help of rapidly developing modern information technologies has become the basis for cybercriminals to cause damage and losses to the country's critical infrastructure.

It has been established that in times of war, the number of cybercrimes has increased many times and is being committed to destabilize the state, cause damage, disable equipment, technology, communications and communications. Hacker attacks can gain control over personal data, databases of large enterprises and institutions, and become a threat to data leakage and network damage.

Key words: cyberattacks, fraudsters, critical infrastructure, information technology, spam.

Постановка проблеми. Кібербезпека є однією з ключових складових інформаційної безпеки, яка спрямована на захист конфіденційності, цілісності та доступності даних у цифровому середовищі. Однак, злочинність у кіберпросторі значно впливає на ефективність реалізації основних принципів кібербезпеки. До ключових принципів кібербезпеки, на які впливають злочинні дії, можна віднести:

Злочинні дії, такі як крадіжка персональних або корпоративних даних, безпосередньо підривають принцип конфіденційності. Атаки типу фішинг або зловмисне використання вразливостей у програмному забезпеченні призводять до несанкціонованого доступу до чутливої інформації, що є порушенням цього принципу. Наприклад, атаки на бази даних із персональною інформацією користувачів загрожують конфіденційності, оскільки отримана інформація може бути використана для подальших злочинних дій або продана на чорному ринку.

Злочинність у кіберпросторі може суттєво вплинути на цілісність даних шляхом їх модифікації або пошкодження. Зловмисники часто змінюють або маніпулюють даними з метою викривлення фактів, що особливо небезпечно у фінансовій сфері або при роботі з державними документами. Атаки, спрямовані на порушення цілісності даних, можуть бути пов'язані з використанням шкідливих програм або програмних помилок, що дозволяють змінювати інформацію без відома користувача.

Атаки типу DDoS (Distributed Denial of Service) є типовим прикладом злочинних дій, що спрямовані на порушення доступності інформаційних ресурсів. Внаслідок таких атак легітимні користувачі втрачають доступ до необхідних сервісів або систем. Злочинці також можуть використовувати програми-вимагачі (ransomware), які блокують доступ до систем або даних до моменту сплати викупу.

Злочинні дії, такі як використання вкрадених облікових даних або маніпуляції з системами багатфакторної аутентифікації, можуть призвести до порушення принципу аутентифікації. Несанкціонований доступ до облікових записів користувачів з використанням вкрадених паролів або компрометація інших методів аутентифікації, таких як біометричні дані, стає все більш поширеним явищем у контексті кіберзлочинності.

Здатність до відстежування дій у системі є ключовою для виявлення та протидії злочинності у кіберпросторі. Проте кіберзлочинці використовують складні методи приховування своїх дій, такі як анонімізація трафіку, використання шифрування та інших технологій, що ускладнюють ідентифікацію нападників і подальшу відповідальність за їхні дії.

Стан дослідження. Згідно даним World Economic Forum [1], глобальна вартість кіберзлочинів прогнозується на рівні 23,84 трлн доларів США до 2027 року, що свідчить про значне зростання з 8,44 трлн у 2022 році. Така динаміка пов'язана із зростанням використання інтернету для особистих та бізнес-операцій, що робить кіберпростір більш уразливим для атак. У 2023 році кількість кібератак сягнула понад 800 000 на рік.

Візуалізація різних аспектів кіберзлочинності у 2023 році представлена на рисунку 1, де фішингові атаки мають найбільший вплив і становлять 45%, програми-вимагачі – 30%, DDoS-атаки – 15% та 10% – інші кіберзагрози.

Стрімке зростання кількості кіберзагроз за 2020-2023 рр. характеризує глобальну небезпеку (рис. 2) для кожної країни світу та населення.

Вплив кібератак на різні галузі економіки у 2023 році вказує на те, що такі сектори економіки, як виробництво, сільське господарство, банківська діяльність та страхування, найбільше постраждали від кібератак (рис. 3).

Ці діаграми демонструють поточні тенденції та вплив кіберзлочинності на глобальну економіку і безпеку.

Таким чином, злочинність у кіберпросторі має суттєвий вплив на основні принципи кібербезпеки, створюючи нові виклики для забезпечення надійного захисту інформаційних систем. Реагування на ці виклики потребує постійного вдосконалення технологій захисту, підвищення обізнаності користувачів та розвитку міжнародної співпраці у сфері кібербезпеки.

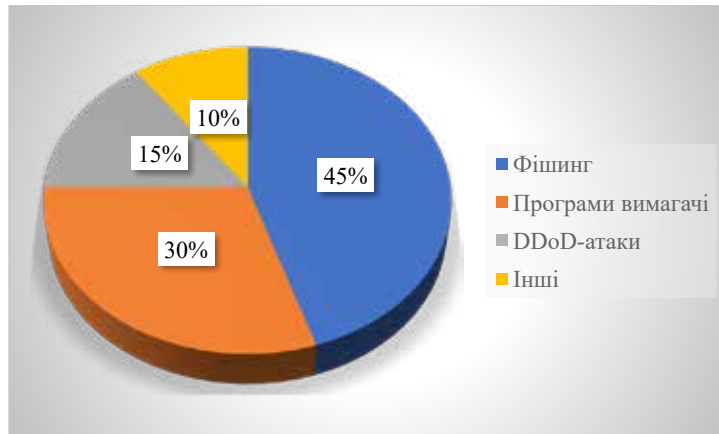


Рис. 1. Поширеність основних кіберзагроз у 2023 році

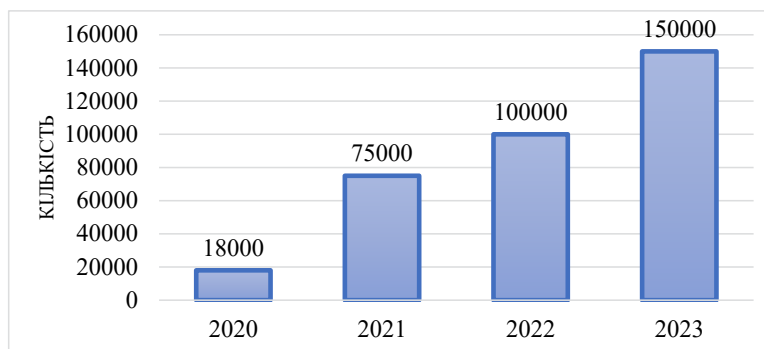


Рис. 2. Кількість кібератак у 2020-2023 роках.

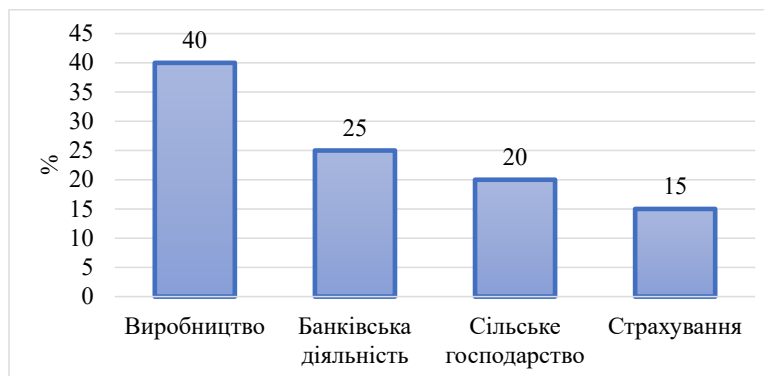


Рис. 3. Вплив кібератак на галузі економіки у 2023 році.

Метою статті є дослідження глобального інформаційного простору, який став безмежним місцем та інструментом для злочинів.

Виклад основного матеріалу. Кіберзлочинність на глобальному рівні демонструє стійку тенденцію до експоненційного зростання, при цьому її форми стають дедалі різноманітнішими, що створює суттєві загрози як для фізичних осіб, так і для підприємницьких структур та національної безпеки в цілому. Активне впровадження інформаційних технологій безпосередньо сприяє ескалації кіберзлочинів, які проникли у всі ключові сфери суспільного життя та економічної діяльності.

Багаточисленні збройні конфлікти та війни, що тривають у різних частинах світу, забезпечили ідеальні умови для розгортання технологічних війн у кіберпросторі. Зокрема, війна в Україні стала тестовим полігоном для апробації різноманітних типів кіберзлочинів, спрямованих на підірив інформаційного суверенітету держави та дестабілізацію її економічних секторів, таких як фінансовий, виробничо-промисловий та енергетичний.

Кожна держава реалізує власні стратегії щодо запобігання, нейтралізації та протидії різноманітним кіберзагрозам, використовуючи диференційовані методи та тактики кіберзахисту. У цьому контексті розробка інтегрованих підходів, гармонізованих методологій і нормативно-правових актів для зміцнення резильєнтності інформаційного простору є ключовим завданням для формування національної кіберстійкості. Це включає подолання негативних наслідків, спричинених кібератаками, що використовують складні інформаційно-комунікаційні технології.

Сфера підприємництва також стикається з ескалацією кіберризиків, що здатні призвести до значних втрат через витоки інформації, зокрема унаслідок таких загроз, як соціальна інженерія, кібершантаж, деструктивні кібератаки та порушення конфіденційності персональних і комерційних даних. Це безпосередньо впливає на зниження операційної ефективності бізнесу та скорочення прибутковості.

Зростання зусиль у протидії потенційним негативним наслідкам кіберзагроз варіюється залежно від рівня фінансових інвестицій, необхідних для впровадження передових рішень у сфері кібербезпеки, а також від підготовки висококваліфікованих спеціалістів у галузі інформаційної безпеки. Підготовка таких фахівців, включно з їх безперервною освітою та адаптацією до швидко мінливого технологічного середовища, є критично важливою для забезпечення надійної кіберзахисності.

Близько 52% організацій заявляють про відсутність ресурсів та навичок для боротьби із кібершахрайством.

Фішинг, шкідливе програмне забезпечення, спам, шкідливі повідомлення та інші загрози є одними з найпоширеніших інструментів, які кіберзлочинці використовують для здійснення атак на підприємства. Окрім цих методів, зростає кількість атак із використанням програм-вимагачів (ransomware), які блокують доступ до даних та вимагають викуп за їхнє відновлення. Також поширеними стають DDoS-атаки, що спричиняють перевантаження серверів або систем компаній, порушуючи їхнє нормальне функціонування. Не менш небезпечними є атаки на ланцюги постачань, коли кіберзлочинці вражають систему постачальників чи партнерів з метою отримання доступу до цільових компаній. Особливу загрозу також становлять атаки, які використовують вразливості типу «zero-day», коли зловмисники експлуатують недоліки в програмному забезпеченні, які ще не були виявлені або усунені, що значно ускладнює захист від таких атак.

Великі підприємства в усьому світі показали значні успіхи щодо захисту своєї кіберстійкості у 2023 році, а малі підприємства значне зниження кіберстійкості на 30% у порівнянні із 2022 роком.

Кількість організацій, які постраждали від кіберзагроз за 2022 рік, становить 41%. Саме в цих організаціях загроза була спричинена третьою стороною. У 54% організацій загроза виникла через неперевіреніх та ненадійних партнерів і постачальників.

Керівники 64% організацій вважають, що кіберстійкість їх організації відповідає вимогам щодо захисту.

У 60% організацій, в яких керівники застосували заходи щодо упередження кіберзловживань через впровадження конфіденційності інформації, нормативно-правових актів, впровадження відеоспостережень, призвело до зниження ризиків на 21% у порівнянні з 2022 роком.

Аналітики стверджують, що впровадження новітніх технологій, таких як штучний інтелект (ШІ), значно підвищить кіберстійкість підприємств завдяки автоматизації процесів виявлення та реагування на кіберзагрози. ШІ здатен аналізувати великі обсяги даних у реальному часі, ідентифікуючи аномальні дії або поведінкові патерни, які можуть свідчити про кібератаки. Використання алгоритмів машинного навчання дозволяє не лише швидше реагувати на існуючі загрози, але й прогнозувати потенційні уразливості до того, як вони будуть використані зловмисниками. Це дає можливість підприємствам не лише захищати свої мережі від відомих атак, але й адаптуватися до нових загроз у міру їхнього виникнення, що робить захист більш ефективним і проактивним. Із стрімким освоєнням інформаційних технологій, громадськість, суспільство та організації, найчастіше застосовують принципи безпеки та захисту для своїх гаджетів, планшетів, комп'ютерів та даних.

Нові технології зараз широко використовуються для захисту інформації від кіберінцидентів, ніж і раніше. Галузі, які найчастіше потерпали від кіберзагроз, а саме промисловість (65%), сільське господарство (63%), банківська справа (56%) і страхування (56%), інформаційні технології та телекомунікації (52%), у 2023 році були найбільшими лідерами, які використали технологію штучного інтелекту для боротьби із кібервикликами.

В умовах розвитку кібербезпеки, боротьби із економічними злочинами, виникає питання щодо попиту талановитих, висококваліфікованих кадрів щодо роботи у сфері кібербезпеки. Брак професіоналів та фахівців стає найчастіше питанням керівників для створення надійного захисту та кіберстійкості організації.

У 2022 році 6% керівників повідомили, що їм не вистачає фахівців для реагування на кіберінциденти, а у 2023 році, вже 12% керівників повідомили, що їм не вистачає таких фахівців. Що вказує на зростання загроз та викликів.

За попередніми опитуваннями керівників організацій щодо впливу кібератак на їх подальшу діяльність, необхідно зазначити, що керівники більше турбуються про збої в роботі після кібератак (39,5%), потім про фінансові втрати (36,05%), репутацію своєї організації (18,6%) і лише 5,81% на контроль регулятора їх діяльності (рис. 4).

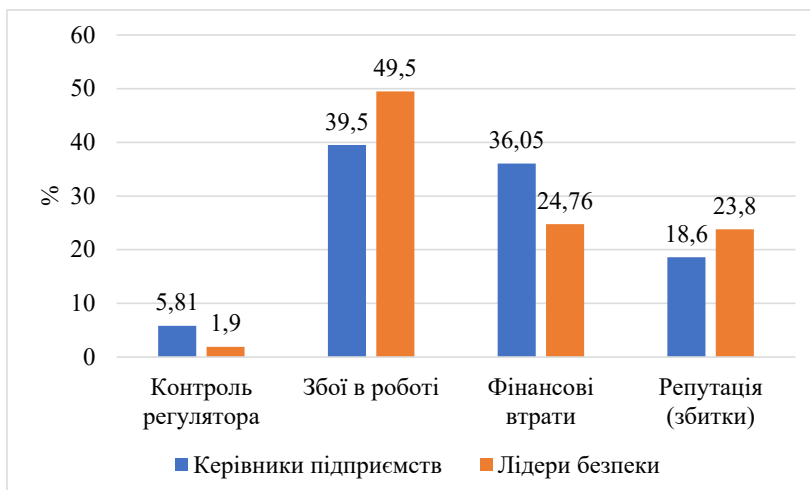


Рис. 4. Вплив кібератак на діяльність організації

Майже 50% кіберлідерів увагу приділяють нестійкості в роботі після кібератак, потім про фінансові втрати (24,76%), репутації організації (23,8%) і лише 1,9% контролю регулятора їх діяльності (рис. 4).

Для лідерів безпеки перешкодами для кіберстійкості в організаціях є прогалини в навичках (32%), є вартість щодо змін застарілих процесів (29%) та несприйняття змін серед керівників чи працівників (25%) (рис. 5).



Рис. 5. Вплив кібератак на діяльність організації

Для керівників підприємств ключовими викликами залишаються прогалини у навичках та вартість модернізації застарілих процесів, що відображено у значних показниках – 38% і 32% відповідно. Це свідчить про те, що підприємства часто зіштовхуються з дефіцитом кваліфікованих кадрів, які можуть ефективно впроваджувати сучасні технологічні рішення для підвищення кіберстійкості. Натомість лідери безпеки також зазначають ці проблеми, але значно менше акцентують увагу на вартості процесів (14%) порівняно з прогалинами у навичках (32%).

Відсутність бажання до змін та невизначеність у тому, з чого починати, залишаються основними перешкодами для багатьох організацій, особливо коли йдеться про впровадження нових технологій. Це особливо проявляється серед лідерів безпеки, де 25% відзначають відсутність бажання змінювати процеси, тоді як серед керівників підприємств цей показник складає лише 8%. Така різниця може свідчити про те, що безпекові структури більш обережні у впровадженні змін, оскільки це може вплинути на їхню кіберстійкість.

Водночас впровадження штучного інтелекту посилює розрив між тими організаціями, які активно використовують новітні технології, і тими, хто не встигає за цими змінами. Повільна модернізація або

відсутність оновлення застарілих інформаційних систем призводить до зростання ризиків, що відображено у даних графіку, де 17% керівників підприємств бачать проблему у тому, що ризик не виправдовує інвестиційні витрати. Однак лідери безпеки оцінюють цей фактор значно нижче, лише на рівні 1%, що може свідчити про їхню більшу готовність до інвестицій в оновлення технологій.

Питаннями національного рівня є визначення кіберзагроз, заходів та можливостей кібербезпеки, розробка основних показників кібербезпеки, їх дослідження за певними ознаками та створення відповідних груп показників кібербезпеки для аналізу та розробки заходів щодо їх уникнення. Метою проведення такого дослідження є сприяння глобальній культурі кібербезпеки та поліпшення сфери захисту в усьому світі [3]. Забезпечення кібербезпеки можливо тільки за рахунок комплексного і безперервного застосування організаційно-правових та технічних методів захисту на різних рівнях реалізації [4].

Для формування безпечного інформаційного простору на національному рівні, спрямованого на мінімізацію кіберризиків, необхідно впроваджувати комплексні механізми та інструменти управління кібербезпекою. Ці механізми мають забезпечувати виявлення, ідентифікацію, оцінку та запобігання ризикам, що загрожують інформаційним системам, шляхом створення проактивних заходів захисту. Важливою складовою цього процесу є не лише технічний захист, але й стратегічне управління ризиками, що включає в себе ретельний аналіз потенційних загроз, розробку критеріїв оцінювання ефективності захисту, а також визначення ключових показників, за якими здійснюється моніторинг рівня кібербезпеки.

У сучасних умовах стрімкого зростання кіберзагроз для всіх секторів економіки стає очевидною необхідність значного посилення заходів з кібербезпеки в Україні. Це включає розробку стратегічних рішень, які забезпечать не лише кіберстійкість окремих підприємств, але й загальну стійкість бізнес-середовища. Особливої уваги потребують компанії, які надають послуги з безпеки, оскільки вони стають першою лінією оборони у випадку кібератак. Багато керівників організацій визнають, що інтеграція кіберстійкості в бізнес-стратегію є необхідним елементом для забезпечення довгострокової конкурентоспроможності та захисту від зростаючих ризиків у цифровому середовищі.

Розвиток цифрових технологій, попри їхні численні переваги, водночас створює нові можливості для злочинної діяльності, що загрожує глобальній безпеці. Сучасні технологічні досягнення надають злочинцям інструменти для проведення більш складних і масштабних кібератак, що впливають на критичну інфраструктуру, фінансові системи та державні установи.

Це особливо актуально для країн, які вже піддаються агресивним кібератакам, таких як Україна. У таких умовах, вирішення технічних, організаційних та правових питань кібербезпеки, стає критично важливим. Країни мають розробляти нові стратегії для посилення своєї кіберстійкості, включаючи впровадження ефективних технологічних рішень, удосконалення правових норм і регулювань, а також формування міцних організаційних структур, здатних протистояти постійно зростаючим загрозам у цифровому просторі.

Для забезпечення більш комплексного підходу до кіберстійкості необхідно зосередитися на розвитку інноваційних рішень у сфері кібербезпеки, що дозволить підвищити рівень захищеності інформаційних систем на всіх рівнях управління. Це передбачає не лише інвестування в новітні технології, але й створення ефективної системи підготовки кадрів, здатних оперативно реагувати на нові виклики та кіберзагрози [6].

Крім того, важливою складовою кіберстійкості є створення гнучкої регуляторної бази, яка б адекватно реагувала на сучасні виклики. Це включає вдосконалення законодавства у сфері захисту даних, відповідальності за кіберзлочини та регулювання використання новітніх технологій, таких як штучний інтелект і блокчейн. Важливо, щоб правові механізми відповідали сучасним тенденціям розвитку технологій і забезпечували захист не тільки державних, але й приватних підприємств та громадян.

Не менш важливим є міжнародне співробітництво, оскільки кібератаки рідко обмежуються національними кордонами. Спільні зусилля на глобальному рівні, включаючи обмін інформацією між державами та міжнародними організаціями, дозволять більш ефективно протистояти загрозам, що з'являються у цифровому просторі. Інтернаціоналізація зусиль з кіберзахисту стає ключовою у боротьбі з кіберзлочинністю, оскільки лише тісна співпраця дозволить своєчасно виявляти та блокувати загрози на глобальному рівні.

Висновки. Таким чином, з урахуванням усіх аспектів, кіберстійкість має стати не просто питанням технічних рішень, але й загальнонаціональною стратегією, яка передбачатиме залучення різних секторів – від урядових структур до приватних компаній та освітніх установ. Створення спільної екосистеми кібербезпеки дозволить не лише знизити рівень загроз, але й сприяти стійкому розвитку цифрової економіки та забезпеченню стабільного функціонування всіх інституцій в умовах постійно змінюваного кіберпростору.

Окремо необхідно підкреслити важливість освіти в сфері кібербезпеки. Підготовка ІТ-фахівців високого рівня та організація навчальних програм для керівників і співробітників підприємств з питань захисту інформаційних систем, є одним із пріоритетних завдань. Тільки таким чином можна гарантувати, що підприємства будуть підготовлені до зустрічі з новими викликами та загрозами, що виникають у цифровому середовищі.

Список використаних джерел:

1. World Economic Forum. Global Cybersecurity Outlook 2024. Insight Report January 2024. Режим доступу: URL: <https://weforum.org>
2. Rubalchenko L., Kosychenko O. Features of latency of economic crimes in Ukraine. Scientific Bulletin of the Dnipropetrovsk State University of Internal Affairs. 2019. Special Issue № 1 (102). – p. 264-267. <https://doi.org/10.31733/2078-3566-2019-5-264-268>
3. Рибальченко Л.В. Кіберзлочинність в глобальному просторі. Науковий вісник Дніпропетровського державного університету внутрішніх справ. – 2022. – Спеціальний випуск № 2 (121). – С. 524-530. <https://doi.org/10.31733/2078-3566-2022-6-524-530>
4. Гребенюк А.М., Рибальченко Л.В. Основи управління інформаційною безпекою: навч. посіб. – Дніпро: ДДУВС, 2020. – 144 с. <https://scholar.google.com.ua/citations?user=WCRn9eAAAAAJ&hl=ru&oi=sra>
5. Rybalchenko L.V., Kosychenko O.O., Klinitskyi I.I. Ensuring economic security of enterprises taking into account the peculiarities of information security. Philosophy, Economics and Law Review. Volume 2, no. 1, 2022 p. 96-107. <https://doi.org/10.31733/2786-491X-2022-1-96-107>
6. Haborets O. Ensuring cybersecurity of Ukraine against cyberterrorism threats: a systematic approach. Scientific innovations and advanced technologies. Issue № 11(25) 2023. p. 197–205. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-11\(25\)-197-205](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-11(25)-197-205)

References:

1. World Economic Forum. Global Cybersecurity Outlook 2024. Insight Report January 2024. Access mode: URL: <https://weforum.org>
2. Rubalchenko L., Kosychenko O. (2019). Features of latency of economic crimes in Ukraine. Scientific Bulletin of the Dnipropetrovsk State University of Internal Affairs. Special Issue № 1 (102). – p.264-267. <https://doi.org/10.31733/2078-3566-2019-5-264-268>
3. Rybalchenko L. (2022). Cybercrime in the global space / L. Rybalchenko // Scientific Bulletin of the Dnipropetrovsk State University of Internal Affairs. – Special Issue № 2 (121). – С. 524-530. <https://doi.org/10.31733/2078-3566-2022-6-524-530>
4. Hrebenyuk A.M., & Rybalchenko L.V. (2020). Fundamentals of information security management: training. manual. [Osnovy upravlinnya informatsiynoyu bezpekoyu: navch. posibnyk]. Dnipro: DDUVS, – 144 с. <https://scholar.google.com.ua/citations?user=WCRn9eAAAAAJ&hl=ru&oi=sra>. [in Ukrainian]
5. Rybalchenko L.V., Kosychenko O.O., Klinitskyi I.I. (2022). Ensuring economic security of enterprises taking into account the peculiarities of information security. Philosophy, Economics and Law Review. Volume 2, no. 1, p. 96-107. <https://doi.org/10.31733/2786-491X-2022-1-96-107>
6. Haborets O. (2023). Ensuring cybersecurity of Ukraine against cyberterrorism threats: a systematic approach. Scientific innovations and advanced technologies. Issue № 11(25). p. 197–205. [https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-11\(25\)-197-205](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2023-11(25)-197-205)

Chechet A. S., Frontend Developer
New Edge DWC-LLC (United Arab Emirates)
ORCID: 0009-0002-4919-9957

Chernykh M. V., Senior Software Engineer
Boom Pay, Inc (United States of America)
ORCID: 0009-0004-5871-4628

Panasiuk Ia. S., Master, Engineering Manager
Agoda Services Co., Ltd. (Thailand)
ORCID: 0009-0009-5600-2084

Abdullin I. I., Software Developer
National Information Technology Center (Kyrgyz Republic)
ORCID: 0009-0003-7632-380X

FRONT-END SECURITY ARCHITECTURE: PROTECTION OF USER DATA AND PRIVACY

Investigation of this topic is relevant in light of the significant increase in the frequency and scale of cyber-attacks that affect various industries and organisations. The purpose of this study is to analyse existing data protection methods at the Front-end, which are able to effectively protect the confidentiality of user data in the face of modern cyber threats. Among the methods used, the analytical method, synthesis, classification, statistical and other methods should be noted. The study identified serious risks associated with storing confidential data on the client side. In particular, the use of cookies and local storage turned out to be vulnerable points that pose potential threats to data security. An analysis of existing web applications revealed the presence of cross-site scripting (XSS) vulnerabilities, which became a route for the introduction of malicious scripts. It was revealed that the generation and use of unique cross-site request forgery (CSRF) tokens for each request play a key role in preventing cross-site request forgery. The implementation of Governance as Code (GaC) technology has demonstrated potential for automating compliance with established architectural and security standards, thereby reinforcing front-end defenses against cyber threats. The findings emphasise the importance of educating end users on the basic principles of network security. The study highlights the importance of developers' active involvement in Front-end security. Thus, a comprehensive overview of the Front-end security architecture with a focus on protecting user data and ensuring privacy is provided. The practical significance of the study lies in the provision of specific recommendations and practical solutions to improve Front-end security in web applications and represents a valuable set of tools and approaches that can be applied by developers and engineers to strengthen the security of web applications. The addition of Governance as Code technology introduces an innovative layer of automated security enforcement that is particularly suited to addressing emerging cybersecurity challenges in real-time.

Key words: data encryption, vulnerabilities, cross-site scripting, technology development, implementation, architecture, governance as code.

Чечет А. С., Черних М. В., Панасюк Я. С., Абдулін І. І. Зовнішня архітектура безпеки: захист даних користувача та конфіденційності

Дослідження цієї теми є актуальним у світлі значного збільшення частоти та масштабів кібератак, які зачіпають різні галузі та організації. Метою цього дослідження є аналіз існуючих методів захисту даних у Front-end, які здатні ефективно захистити конфіденційність даних користувачів перед обличчям сучасних кіберзагроз. Серед використовуваних методів слід відзначити аналітичний метод, метод синтезу, класифікації, статистичні та інші методи. Дослідження виявило серйозні ризики, пов'язані зі зберіганням конфіденційних даних на стороні клієнта. Зокрема, вразливими місцями, які становлять потенційну загрозу безпеці даних, виявилось використання файлів cookie та локального сховища. Аналіз існуючих веб-додатків виявив наявність уразливостей міжсайтового сценарію, які стали шляхом для впровадження шкідливих скриптів. Було виявлено, що створення та використання унікальних маркерів підробки міжсайтових запитів для кожного запиту відіграє ключову роль у запобіганні підробці міжсайтових запитів. Впровадження технології «Управління як код» продемонструвало потенціал для автоматизації дотримання встановлених архітектурних стандартів і стандартів безпеки, тим самим посилюючи зовнішній захист від кіберзагроз. Висновки підкреслюють важливість навчання кінцевих користувачів основним принципам безпеки мережі. Дослідження підкреслює важливість активної участі розробників у захисті Front-end. Таким чином, надається вичерпний огляд архітектури безпеки Front-end з акцентом на захист даних користувачів і забезпечення конфіденційності. Прак-

тичне значення дослідження полягає в наданні конкретних рекомендацій і практичних рішень для покращення Front-end безпеки у веб-додатках і являє собою цінний набір інструментів і підходів, які можуть застосовуватися розробниками та інженерами для посилення безпеки веб-додатків. Додавання технології «Управління як код» представляє інноваційний рівень автоматизованого забезпечення безпеки, який особливо підходить для вирішення нових проблем кібербезпеки в режимі реального часу.

Ключові слова: шифрування даних, вразливості, міжсайтовий скриптинг, розробка технології, впровадження, архітектура, управління як код.

Formulation of the problem. In the digital age, when web applications and interactive interfaces are becoming more widespread, Front-end security is becoming an integral part of ensuring high standards of data protection and privacy that meet the requirements of the user experience. The Front-end security architecture plays a crucial role in creating reliable web applications, providing not only modern and functional interfaces, but also reliable protection of data stored and processed on the client side. With the constant growth of threats in the field of cybersecurity, issues related to the protection of user data and privacy are becoming more acute and require a comprehensive approach. The problems of this study are centred on several key aspects. The main challenges are the risks associated with storing and transferring data on the client side, and vulnerabilities and attacks aimed at the Front-end. Analysing and preventing such threats requires not only effective privacy practices, but also compliance with security standards adapted to the specifics of Front-end development.

Analysis of recent research and publications. The study by M. Tsulukidze et al. [1] has determined the current level of personal data protection in Georgia to identify problems and offer recommendations to improve security. As a result, the researchers identified the strengths and weaknesses of the personal data protection system in Georgia and provided suggestions for improving legislation and control mechanisms. The purpose of the study by V. Napetvaridze and A. Chochia [2] was to investigate the development of cybersecurity strategies in Georgia in the context of policy and legal regulation to identify effective methods and recommendations for the future strengthening of cybersecurity. The researchers provided suggestions for finalising existing legislation to better meet modern challenges in cyberspace and developed practical tips and recommendations for ensuring security.

The study by A. Sivasangari et al. [3] has developed and evaluated the effectiveness of integrating blockchain technology into the security structure of medical data to ensure a high level of confidentiality and protection against threats. An integrated blockchain structure has been developed that can provide a high level of security and confidentiality of medical data. The effectiveness of using blockchain technology to solve security problems has been revealed. The main purpose of the study by D. Feldman and E. Haber [4] was to identify modern challenges and threats to privacy in the era of constant access and to develop effective methods and means of data protection. The researchers revealed an increase in the complexity of threats in the era of constant access, including attacks on personal devices, internetwork attacks, and data leaks. Methods for measuring the level of confidentiality have been developed and proposed, including analysis of the encryption level, access control, and data monitoring. The study by D. Amo et al. [5] was dedicated to the analysis and development of a plugin for Moodle, which not only increases the level of user privacy, but also provides support through the use of aliases. The researchers have developed a plugin that provides additional tools and settings for managing data privacy in Moodle. The introduction of user aliases helped to create an additional layer of anonymity, providing a level of trust for students.

These studies are valuable in the context of data security analysis, but they do not cover aspects related to the Front-end security architecture and user data protection at the web application interface level. The study focused on general data protection strategies and methods, without affecting the specifics of Front-end development and security issues at this level. The research mainly described aspects of legal regulation, the effectiveness of integrating technologies and threat analysis methods, but did not provide practical recommendations and solutions aimed at protecting user data through Front-end architecture.

The purpose of the article is to analyse the threats and risks associated with Front-end architecture. Additionally, within the framework of the study, the following tasks were set: analysis of existing security standards, such as Open Web Application Security Project (OWASP) Top Ten, and their compliance with modern security requirements for Front-end applications; development of recommendations for the use of modern encryption methods that contribute to the creation of secure web applications for effective protection of user data during their transfer and storage.

To ensure the security and confidentiality of data in the Front-end, a comprehensive methodology was applied, encompassing analytical and statistical methods. The analytical method examined the Front-end security architecture, identifying vulnerabilities and assessing the effectiveness of security measures. This analysis, combined with secure architectural design, led to recommendations for preventing XSS attacks, improving CSRF token usage, and enhancing end-user training. The statistical method evaluated data characteristics such as mean, median, and standard deviation to understand data structure and security features. Statistical tests like t-tests, ANOVA, and correlation analysis determined the effectiveness of specific security measures, providing a basis for sound decisions and predictions about future Front-end security trends.

Presenting main material. During the analysis of threats and vulnerabilities in the Front-end, a number of key aspects faced by web applications were identified. Cross-site scripting (XSS) is one of the most common types of Front-end attacks [6]. It represents a serious vulnerability when attackers inject malicious scripts into a web page, which are then executed in the user's browser. This can lead to various types of attacks, such as theft of session cookies, interception of input data, and other types of manipulation of a web page or user data. Insufficient filtering of data entry and unverified information output on the client side really create a vulnerability, allowing attackers to inject malicious scripts. In the context of Front-end web applications, where user interaction takes place directly in the browser, cross-site scripting becomes especially dangerous. In such applications, insufficient validation of input data and lack of control over the output of information on the client side can lead to serious consequences, such as theft of user data or performing unauthorised actions on their behalf.

Cross-site request forgery (CSRF) attacks are among the most common and dangerous threats to web applications [7]. In this type of attack, attackers use the user's trust in the website to perform unwanted actions on their behalf. The attacker creates a fake request that is sent to the web server using the user's authentication data, for example, cookies. This request may contain commands to modify the data executed on the server. An example would be a malicious script embedded on another website or sent via a malicious email. When a user visits this site or opens an email, the script executes a request to the target website on behalf of the user. If the website is not protected from CSRF, it can execute this request without even suspecting that it was not initiated by the user. Such attacks lead to various consequences, including changing the user's password, performing financial transactions, sending malicious messages, etc. Therefore, CSRF protection is an important aspect of securing web applications.

The use of cookies and local storage are the main methods of storing data on the client side in web applications [8]. One of the identified risks is the possibility of unauthorised access to data stored in cookies and local storage. Insufficient protection of this data can lead to leaks of confidential information, which is a serious threat to user privacy. An additional aspect of the analysis is the risk of data manipulation on the client side. Attackers may try to change the data stored in cookies or local storage, affecting the operation of the application or even provoking erroneous actions on behalf of the user. In addition, the risk of vulnerability to various forms of attacks, such as data interception and request forgery, has been identified. Unauthorised access to user data or the possibility of introducing malicious scripts through cookies and local storage become paths for potential attacks.

Typical risks such as XSS, and CSRF attacks, together with potential threats related to data storage on the client side, represent important security aspects of Front-end web applications [9]. Figure 1 shows the distribution of threats in Front-end web applications, indicating the importance of each of them in the security context. In the process of creating the diagram, specific characteristics are considered, which makes it an informative tool for making security decisions.

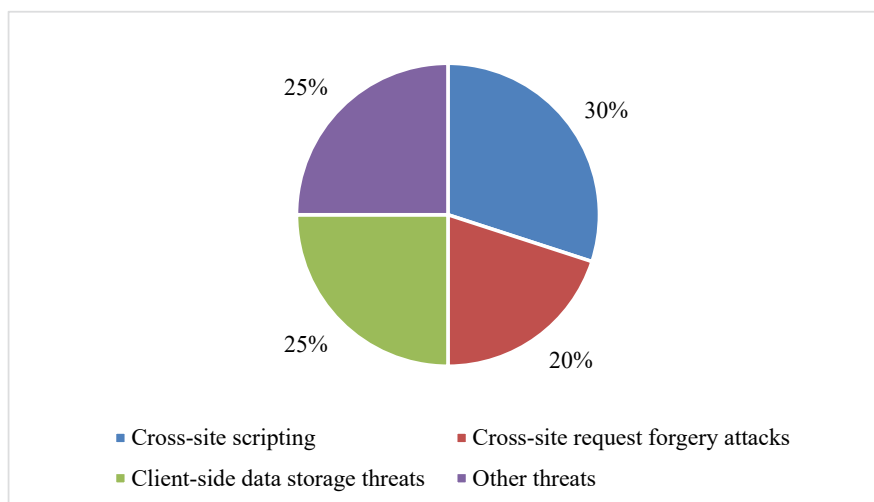


Figure 1. Threat distribution in Front-end web applications

Source: compiled by the authors

The concept of security in Front-end development is becoming increasingly critical in the face of ever-increasing cyber threats [10]. In this regard, the development of effective data encryption mechanisms at the stages of their transmission and storage plays an important role. When choosing the appropriate encryption algorithms to ensure the security of the Front-end architecture, various aspects must be considered, including the security and performance requirements of the application. Asymmetric algorithms such as Rivest-Shamir-Adleman (RSA) or Error Correction Code (ECC) can be used to exchange keys and sign data, providing a high level of security when transferring information between the client and the server.

Symmetric algorithms such as Advanced Encryption Standard (AES) provide effective encryption of data on the client side, considering the limited computing resources of the browser [11]. In addition, the use of hash functions such as SHA-256 can ensure data integrity and protect against information substitution during transmission. Evaluating each algorithm in the context of a specific application will help to choose the optimal combination of encryption methods, ensuring a balance between security and performance. Figure 2 demonstrates the importance of these encryption methods.

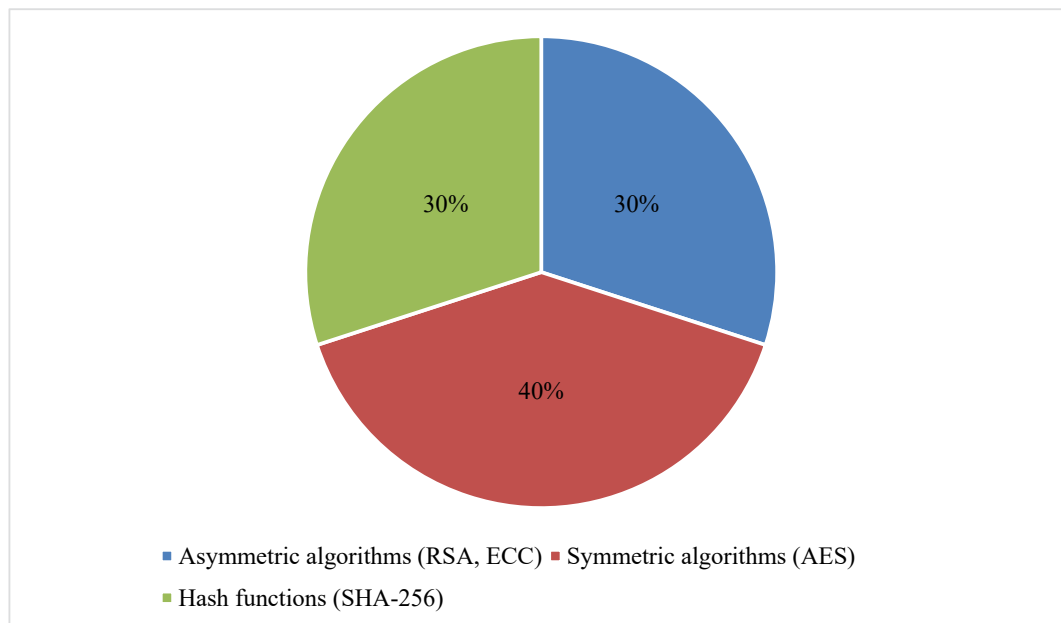


Figure 2. Importance of security data encryption methods Front-end development

Source: compiled by the authors

The use of data encryption during transmission is a key aspect of ensuring the security of web applications. To do this, developers can use transport layer encryption protocols such as HyperText Transfer Protocol Secure (HTTPS) [12]. HTTPS provides secure data transfer between the client and the server by encrypting information, which significantly reduces the risk of hackers intercepting and reading confidential data. When using HTTPS, all traffic between the user's browser and the server is automatically encrypted, which ensures the confidentiality of the transmitted information. This encryption method not only protects user data, but also ensures the integrity and authenticity of the transmitted data. Thus, HTTPS is an effective means of protecting information during transmission on the network. Encryption key management plays an important role in ensuring data security. This includes secure storage and key exchange between the various components of the system. Encryption keys must be protected from unauthorised access, and updated and restored if necessary. Effective key management ensures the safety of information and prevents possible attacks on data.

Testing and auditing of encryption mechanisms are necessary to ensure their reliability and security [13]. Regular vulnerability checks and audits help identify potential problems and errors in the implementation of data encryption. This allows developers to fix the detected vulnerabilities and increase the security level of the system as a whole. Testing and auditing also contribute to compliance with security standards and ensure user confidence in the system.

The introduction of authentication and authorisation mechanisms is a critical step in ensuring the security of the system [14]. The authentication mechanism is designed to verify the authenticity of users by authenticating their IDs. The study examines various authentication methods such as password authentication, two-factor authentication, biometric authentication, etc. The goal is to ensure reliable authentication of users before granting access to confidential data. The authorisation mechanism determines user access rights to various resources and system functionality. Access rights management methods, role-based access model, role-based access policies, and other aspects were considered. The goal is to ensure that only authorised users have access to certain sensitive data corresponding to their roles and rights. The consideration of these mechanisms in the framework of the study is aimed at ensuring that only authorised users have access to confidential data, and at preventing unauthorised access to them. All these mechanisms work together to protect the confidentiality of data, prevent unauthorised access to it, and ensure compliance with information security principles. Their consideration and analysis within the framework of the study helps to identify and implement optimal data protection strategies in the Front-end architecture. Figure 3 depicts the importance of different authentication mechanisms in Front-end development.

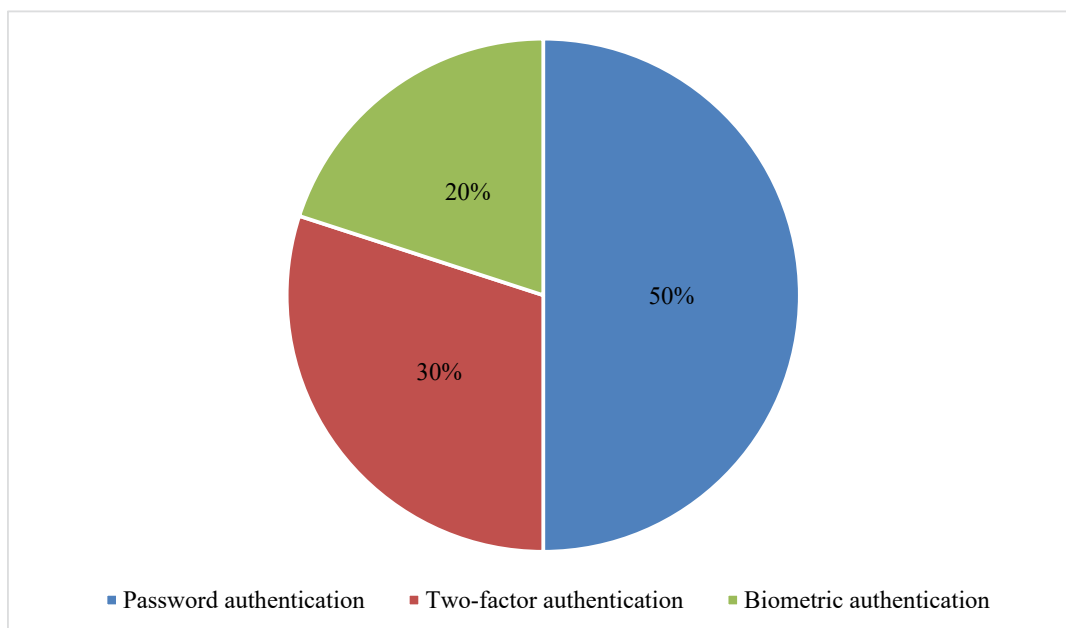


Figure 3. Importance of authentication mechanisms in Front-end development

Source: compiled by the authors

To ensure the security of the Front-end architecture, compliance with security standards such as OWASP Top Ten is of particular importance, which is a key aspect of achieving this goal. This ensures not only that the technologies and methods used comply with security recommendations, but also provides developers with a reliable foundation to minimise risks and vulnerabilities during the development and operation of Front-end applications. By complying with OWASP Top Ten security standards, developers get access to an extensive set of recommendations and best practices that can be directly applied to applications under development. These recommendations cover various aspects of security, including protection against cross-site scripting, Structured Query Language (SQL) injections, incorrect authentication, incorrect authorisation, and other common threats. Compliance with security standards also helps to raise developers' awareness of current trends and threats in the field of cybersecurity. This allows them to be prepared for new threats and respond effectively to them using advanced protection methods. Moreover, by complying with security standards, developers get the opportunity to demonstrate a high level of user data protection, which strengthens trust in their applications and helps strengthen the company's image as a whole.

Training and awareness-raising are important components in ensuring the security of Front-end architecture [15]. To achieve this goal, training events are held for both end users and developers. For end users, the training covers various aspects of security in an online environment, including the threats they may face when using web applications, and data protection methods. This may include training on how to store passwords securely, recognise suspicious activity, and notify about security threats. For developers, the training is aimed at an in-depth understanding of data protection methods and the application of best practices in the development of Front-end applications. This includes training on modern security threats, authentication and authorisation methods, and data encryption principles. Training events for developers may also include practical exercises and case studies, allowing them to put their knowledge into practice and develop secure applications from the very beginning of the process.

Considering the development of an effective Front-end architecture, key recommendations are highlighted, based on which developers can actively contribute to ensuring the security of the Front-end. The following aspects are personal recommendations developed based on the analysis. It is recommended to conduct periodic code audits with an emphasis on identifying potential vulnerabilities and evaluating the overall security of the code base. This approach will help identify and fix problems even at the development stage, reducing security risks. It is important to actively monitor updates to third-party libraries and components used in the project. It is recommended to update dependencies regularly, implementing security fixes, and paying special attention to maintaining up-to-date versions. Developers are advised to strictly adhere to established security standards during the design and writing of Front-end code. This includes the use of safe programming practices, proper data entry processing, and careful management of cross-site scripting.

The recommendations provide for careful monitoring of data storage methods on the client side, considering the specifics of threat and vulnerability analysis. In this context, it is recommended to actively use encryption mechanisms for data stored on the client side in order to prevent unauthorised access and protect confidential user information from possible threats. It is also strongly recommended to use the HTTPS protocol to ensure secure data transfer between the client and the server.

Threat and vulnerability analysis highlighted the importance of combating cross-site scripting, CSRF attacks, and the risks associated with client-side data storage. The study of cross-site scripting revealed that insufficient filtering of data entry and unverified output of information can open up opportunities for the introduction of malicious scripts. Recommendations include implementing strict filtering methods, secure data output, and using Content Security Policy to prevent XSS attacks. Analysis of CSRF attacks has revealed their serious threat potential, especially in the context of Front-end web applications. Recommendations include the introduction of mechanisms for generating unique CSRF tokens, regular updating of session data, and strict access control to important operations. An assessment of vulnerabilities related to data storage on the client side revealed the risks associated with the use of cookies and local storage.

These personalised recommendations provide practical steps to improve the security of Front-end development and can be implemented into the workflow to ensure the reliability and protection of web applications being created.

The Front-end security architecture is a fundamental aspect of security in web applications. The research has penetrated deeply into this issue, identifying key points that form the basis for the reliability and confidentiality of user data. Interface design has a significant impact on the overall security of the system, and this study emphasises that effective protection begins from the very beginning of development – with Front-end design. The threat analysis highlighted the importance of developing and implementing effective mechanisms to protect user data. The methods of storing and transmitting data on the client side pose significant risks that require reliable measures to ensure them. Various types of attacks, such as cross-site scripting and cross-site request forgery, can leak confidential information and cause damage to both users and organisations.

It is important to note that a detailed examination of the Front-end architecture reveals vulnerabilities and security threats that may be overlooked at higher levels of development. The study raised questions not only about the technical side of security, but also about the impact of interface design on data security.

The research represents a very relevant contribution to the modern digital world, where threats to the security of user data are becoming more significant. With the growth of digitalisation and the widespread use of web applications, ensuring reliable protection of user data is becoming an integral part of development. The importance of education and training for both developers and end users should be emphasised. Teaching users the basics of cybersecurity and developing self-defence skills can significantly reduce the risk of successful attacks.

The purpose of the study by P.N. Hiremath et al. [16] was a critical analysis of the MyWebGuard tool in terms of its effectiveness in ensuring security and protecting online privacy. The research was aimed at identifying the strengths, possible limitations, and potential for improvements of this tool. The results not only identified strengths and areas for further improvement of the tool, but also provided valuable recommendations for developers and users in order to improve the security environment on the Internet. Both studies successfully address security and privacy concerns, and contain overlapping recommendations or conclusions. The main purpose of the study by P.N. Hiremath et al. [16] was to identify the strengths and weaknesses of this tool, and to provide recommendations for its improvement. In turn, this study focuses on the analysis of existing data protection methods at the Front-end, which contribute to the creation of an effective and reliable architecture for protecting user data in the face of modern cyber threats. Both studies aim to increase the level of security on the Internet.

S. Hutt et al. [17] evaluated the current infrastructure used in the Massive Open Online Course (MOOC) and its compliance with security and privacy requirements. The assessment of the technical side of the MOOC infrastructure included an analysis of the protection of servers, databases, and their transfer. The researcher identified technological weaknesses and vulnerabilities and offered recommendations for their elimination. The effectiveness of access control systems and their ability to prevent unauthorised access to students' personal information was investigated and the privacy policies offered by MOOC providers were analysed. S. Hutt et al. [17] highlighted technological weaknesses and vulnerabilities, offering recommendations for their elimination. The study also assessed the effectiveness of access control systems and their ability to prevent unauthorised access to students' personal information, and analysed the privacy policies offered by MOOC providers. In turn, this study focuses on creating recommendations based on the analysis carried out in it. Both papers emphasise the importance of data security and privacy, but from different perspectives.

A.M. Al Hawamleh et al. [18] examined current challenges in the field of cybersecurity, and the role of ethical hacking in improving the protection of personal information. The results of the study revealed that ethical hacking helps to find potential threats and vulnerabilities before they become critical. It increases the level of awareness in the organisation about possible threats and the need to ensure security. Effective cybersecurity strategies, including ethical hacking, are becoming an integral part of the modern digital world, which ensures security and privacy in the Internet environment. The claim that ethical hacking is an integral part of the modern digital world is controversial. In a number of fields or organisations, this method is not the only correct or appropriate one. Depending on the moral and ethical principles of different individuals or organisations, ethical hacking can be perceived in different ways. It is important to keep in mind that the effectiveness of ethical hacking strongly depends on the context in which it is applied. This method may not be unambiguously recommended in all cases. Both studies highlight the

importance of data protection and cybersecurity, but they have different angles and accents, covering a wide range of topics in the field of information security.

The study by C. Arora [19] aimed to analyse the role and contribution of proxies in ensuring privacy in health information exchange in digital health. The researcher has revealed that trusted persons play a critical role in ensuring trust and confidentiality in the exchange of health data. Their functions, such as access control and data encryption, have had a significant impact on the security of digital healthcare. As a result of the analysis of technological aspects of data protection, it was revealed that the use of modern solutions, including blockchain and effective encryption mechanisms, contributed to the reliable protection of medical data from unauthorised access. In comparison with this study, S. Arora's [19] paper focuses on the analysis of a specific area of digital healthcare and the role of trusted persons in ensuring data security. It examines the broader aspects of data security related to the exchange of medical information in digital healthcare, including access control and encryption technologies. While the Front-end security architecture focuses on developing recommendations and strategies to protect user data at the interface level of web applications. Both studies are important in the context of data security and confidentiality, but they address different aspects and offer different approaches to solving the problem.

The purpose of the study by N. Saravanan and A. Umamakeswari [20] was to analyse the effectiveness of grid access control in the context of cloud environments with hybrid security and identify optimal strategies for protecting user data. The work confirmed that the use of grid access control in cloud infrastructures contributed to the effective organisation of access control, providing flexibility, and scalability. Advantages have been identified, such as simplifying user management, reducing the risks of unauthorised access, and increasing the level of traceability of user actions. The researcher identified areas for improving role based access control (RBAC) efficiency in cloud environments, including the integration of modern authentication technologies and more thorough scalability testing. Scalability testing is an important aspect, however, the effectiveness of lattice access control can be confirmed not only through scalability, but also through overall security and compliance with standards. The areas suggested by the researcher to improve RBAC in cloud environments can be effective, however, it must be borne in mind that the security sphere is constantly evolving, and the need for additional security aspects may also arise in the future. The researcher's recommendations on the integration of modern authentication technologies are well-founded, given the dynamism of cyber threats and the need for constant updating of security methods.

The results of the current study demonstrate that the Front-end security architecture and user data protection face a number of urgent challenges. An analysis of the risks associated with the storage and transfer of data on the client side has revealed the need to develop effective mechanisms to ensure confidentiality. The study also highlights the role of access control mechanisms such as authentication and authorisation in ensuring data privacy protection. Vulnerabilities and attacks focused on the Front-end require constant development of methods to prevent and identify new attack methods, especially in the context of problems such as cross-site scripting and cross-site request forgery. In light of the ever-increasing threats, the importance of this research is undeniable. It not only identifies problems but also offers practical solutions aimed at improving the security of web applications.

Governance as Code (GaC) technology provides a systematic way to ensure that front-end architectures adhere to predefined security standards automatically. This technology can streamline the enforcement of architectural standards, helping to protect user data and enhance privacy in front-end applications. GaC technology allows for the automatic verification of front-end architectures against security models to prevent vulnerabilities and ensures consistency across systems by maintaining uniform security standards [21]. The implementation of GaC automates the enforcement of security rules before deployment, enabling early detection of potential security issues and ensuring compliance with regulations like General Data Protection Regulation (GDPR), Health Insurance Portability and Accountability Act (HIPAA), or California Consumer Privacy Act (CCPA). By defining important security rules as code and applying these automatically using tools like Open Policy Agent, organizations can prevent deployment of applications that do not meet strict security criteria, thus enhancing the overall security posture. Integrating GaC not only facilitates a proactive security approach in front-end development but also helps in maintaining continual compliance and adjusting security measures in response to emerging threats. Given its potential to transform security protocols, Governance as Code technology, as outlined under patent WO2022250564, could significantly mitigate risks associated with user data and privacy violations, setting a new standard in secure software development practices.

Conclusions. Protection of user data and privacy play a key role in modern web applications. The findings emphasise that successful data protection begins with the development stage of Front-end web applications. Technical solutions, such as the use of encryption and measures against attacks, are insufficient without considering the details in the design of the interface. The study revealed various threats and vulnerabilities faced by the Front-end architecture in the field of data privacy protection. Learning encryption mechanisms, access control and adhering to security standards such as the OWASP Top Ten have proven to be key steps in providing strong security.

The study highlights that training and awareness-raising of Front-end developers in the field of security is an essential component of ensuring a reliable architecture. Access control mechanisms such as authentication and authorisation have played a critical role in protecting data privacy. Reliable user authentication and access control to various resources helped prevent unauthorised access and ensure data integrity. The practical tips and

recommendations presented in the study form the basis for developers, providing them with a better understanding and readiness to respond to a variety of threats. Front-end developers, aware of the current threats, make more informed decisions in the process of creating interfaces. The training provides not only theoretical knowledge, but also practical skills necessary to build secure and sustainable web applications.

The practical advice obtained in the course of the study plays a key role in the development of reliable security strategies in the field of Front-end development. They are valuable recommendations that help to increase the level of protection of web applications and interfaces. An important element is the awareness of Front-end developers of current threats and effective methods of preventing them. Moreover, the integration of GaC technology, as detailed in the article, offers a systematic framework to ensure that all elements of the front-end architecture adhere to set security guidelines and configurations. This approach enhances the security strategies implemented, further safeguarding user data from emerging threats and vulnerabilities.

The study provides practical guidance for Front-end developers, highlighting the importance of security education and awareness. The practical tips and recommendations presented in the study create the basis for an effective response to threats, contributing to the creation of more reliable architectures. Subsequent research in this area may focus on the further development of educational programmes and tools to support the security of Front-end development.

Bibliography:

1. Tsulukidze, M., Nyman-Metcalf, K., Tsap, V., Pappel, I., Draheim, D. 2019. Aspects of personal data protection from state and citizen perspectives – Case of Georgia. In: I.O. Pappas, P. Mikalef, Y.K. Dwivedi, L. Jaccheri, J. Krogstie, M. Mäntymäki (Eds.), *Proceedings of the 18th IFIP WG 6.11 Conference on e-Business “Digital Transformation for a Sustainable Society in the 21st Century”* (pp. 476-488). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29374-1_39.
2. Napetvaridze, V., Chochia, A. 2019. Cybersecurity in the making – Policy and law: A case study of Georgia. *International and Comparative Law Review*, 19(2), 155-180. <https://doi.org/10.2478/iclr-2019-0019>.
3. Sivasangari, A., Kishor Sonti, V.J.K., Poonguzhali, S., Deepa, D., Anandhi, T. 2021. Security framework for enhancing security and privacy in healthcare data using blockchain technology. In: A. Khanna, D. Gupta, S. Bhattacharyya, A.E. Hassanien, S. Anand, A. Jaiswal (Eds.), *Proceedings of ICICC 2021 “International Conference on Innovative Computing and Communications”* (pp. 143-158). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2594-7_12.
4. Feldman, D., Haber, E. 2020. Measuring and protecting privacy in the always-on era. *Berkeley Technology Law Journal*, 35(1), 197-250. https://btlj.org/data/articles2020/35_1/05_Haber_FinalFormat_WEB.pdf.
5. Amo, D., Alier, M., García-Peñalvo, F.J., Fonseca, D., Casañ, M.J. 2020. Protected users: A moodle plugin to improve confidentiality and privacy support through user aliases. *Sustainability*, 12(6), 2548. <https://doi.org/10.3390/su12062548>.
6. Kaur, J., Garg, U., Bathla, G. 2023. Detection of cross-site scripting (XSS) attacks using machine learning techniques: A review. *Artificial Intelligence Review*, 56(11), 12725-12769. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10433-3>.
7. Likaj, X., Khodayari, S., Pellegrino, G. 2021. Where we stand (or fall): An analysis of CSRF defenses in web frameworks. In: *RAID '21: Proceedings of the 24th International Symposium on Research in Attacks, Intrusions and Defenses* (pp. 370-385). New York: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3471621.3471846>.
8. Dalimunthe, S., Reza, J., Marzuki, A. 2022. Model for storing tokens in local storage (cookies) using JSON Web Token (JWT) with HMAC (Hash-based Message Authentication Code) in e-learning systems. *Journal of Applied Engineering and Technological Science*, 3(2), 149-155. <https://doi.org/10.37385/jaets.v3i2.662>.
9. Cheah, S., Selvarajah, V. 2021. A Review of common web application breaching techniques (SQLi, XSS, CSRF). In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Integrated Intelligent Computing Communication & Security (ICIIC 2021)* (pp. 540-547). Dordrecht: Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/ahis.k.210913.068>.
10. Walton, S., Wheeler, P.R., Zhang, Y.I., Zhao, X.R. 2020. An integrative review and analysis of cybersecurity research: Current state and future directions. *Journal of Information Systems*, 35(1), 155-186. <https://doi.org/10.2308/isys-19-033>.
11. Kaur, J., Lamba, S., Saini, P. 2021. Advanced encryption standard: Attacks and current research trends. In: *2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)* (pp. 112-116). Greater Noida: Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/ICACITE51222.2021.9404716>.
12. Raman, R.S., Evdokimov, L., Wurstrow, E., Halderman, J.A., Ensafi, R. 2020. Investigating large scale HTTPS interception in Kazakhstan. In: *IMC '20: Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference* (pp. 125-132). New York: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3419394.3423665>.
13. Li, S., Xu, C., Zhang, Y., Du, Y., Chen, K. 2022. Blockchain-based transparent integrity auditing and encrypted deduplication for cloud storage. *IEEE Transactions on Services Computing*, 16(1), 134-146. <https://doi.org/10.1109/TSC.2022.3144430>.

-
14. Omotunde, H., Ahmed, M. 2023. A comprehensive review of security measures in database systems: Assessing authentication, access control, and beyond. *Mesopotamian Journal of Cyber Security*, 2023, 115-133. <https://doi.org/10.58496/mjcs/2023/016>.
 15. Song, L., García-Valls, M. 2022. Improving security of web servers in critical IoT systems through self-monitoring of vulnerabilities. *Sensors*, 22(13), 5004. <https://doi.org/10.3390/s22135004>.
 16. Hiremath, P.N., Armentrout, J., Vu., S., Nguyen, T.N., Minh, Q.T., Phung, P.H. 2019. MyWebGuard: Toward a User-Oriented Tool for Security and Privacy Protection on the Web. In: T.K. Dang, J. Küng, M. Takizawa, S. Ha Bui (Eds.), *Proceedings of the 6th International Conference "Future Data and Security Engineering"* (pp. 506-525). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35653-8_33.
 17. Hutt, S., Baker, R.S., Ashenafi, M.M., Andres-Bray, J.M., Brooks, C. 2022. Controlled outputs, full data: A privacy-protecting infrastructure for MOOC data. *British Journal of Educational Technology*, 53(4), 756-775. <https://doi.org/10.1111/bjet.13231>.
 18. Al Hawamleh, A.M., Alorfi, Sulaiman M, A., Al-Gasawneh, J.A., Al-Rawashdeh, G. 2020. Cyber security and ethical hacking: The importance of protecting user data. *Solid State Technology*, 63, 7894-7899. <https://solidstatetechnology.us/index.php/JSST/article/view/7202>.
 19. Arora, C. 2019. Digital health fiduciaries: Protecting user privacy when sharing health data. *Ethics and Information Technology*, 21(3), 181-196. <https://doi.org/10.1007/s10676-019-09499-x>.
 20. Saravanan, N., Umamakeswari, A. 2021. Lattice based access control for protecting user data in cloud environments with hybrid security. *Computers & Security*, 100, 102074. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.102074>.
 21. Method and system for verifying the architecture of a software/hardware solution. 2022. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2022250564>.

References:

22. Tsulukidze, M., Nyman-Metcalf, K., Tsap, V., Pappel, I., Draheim, D. 2019. Aspects of personal data protection from state and citizen perspectives – Case of Georgia. In: I.O. Pappas, P. Mikalef, Y.K. Dwivedi, L. Jaccheri, J. Krogstie, M. Mäntymäki (Eds.), *Proceedings of the 18th IFIP WG 6.11 Conference on e-Business "Digital Transformation for a Sustainable Society in the 21st Century"* (pp. 476-488). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-29374-1_39.
23. Napetvaridze, V., Chochia, A. 2019. Cybersecurity in the making – Policy and law: A case study of Georgia. *International and Comparative Law Review*, 19(2), 155-180. <https://doi.org/10.2478/iclr-2019-0019>.
24. Sivasangari, A., Kishor Sonti, V.J.K., Poonguzhali, S., Deepa, D., Anandhi, T. 2021. Security framework for enhancing security and privacy in healthcare data using blockchain technology. In: A. Khanna, D. Gupta, S. Bhattacharyya, A.E. Hassanien, S. Anand, A. Jaiswal (Eds.), *Proceedings of ICICC 2021 "International Conference on Innovative Computing and Communications"* (pp. 143-158). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-16-2594-7_12.
25. Feldman, D., Haber, E. 2020. Measuring and protecting privacy in the always-on era. *Berkeley Technology Law Journal*, 35(1), 197-250. https://btlj.org/data/articles2020/35_1/05_Haber_FinalFormat_WEB.pdf.
26. Amo, D., Alier, M., García-Peñalvo, F.J., Fonseca, D., Casañ, M.J. 2020. Protected users: A moodle plugin to improve confidentiality and privacy support through user aliases. *Sustainability*, 12(6), 2548. <https://doi.org/10.3390/su12062548>.
27. Kaur, J., Garg, U., Bathla, G. 2023. Detection of cross-site scripting (XSS) attacks using machine learning techniques: A review. *Artificial Intelligence Review*, 56(11), 12725-12769. <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10433-3>.
28. Likaj, X., Khodayari, S., Pellegrino, G. 2021. Where we stand (or fall): An analysis of CSRF defenses in web frameworks. In: *RAID '21: Proceedings of the 24th International Symposium on Research in Attacks, Intrusions and Defenses* (pp. 370-385). New York: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3471621.3471846>.
29. Dalimunthe, S., Reza, J., Marzuki, A. 2022. Model for storing tokens in local storage (cookies) using JSON Web Token (JWT) with HMAC (Hash-based Message Authentication Code) in e-learning systems. *Journal of Applied Engineering and Technological Science*, 3(2), 149-155. <https://doi.org/10.37385/jaets.v3i2.662>.
30. Cheah, S., Selvarajah, V. 2021. A Review of common web application breaching techniques (SQLi, XSS, CSRF). In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Integrated Intelligent Computing Communication & Security (ICIC 2021)* (pp. 540-547). Dordrecht: Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/ahis.k.210913.068>.
31. Walton, S., Wheeler, P.R., Zhang, Y.I., Zhao, X.R. 2020. An integrative review and analysis of cybersecurity research: Current state and future directions. *Journal of Information Systems*, 35(1), 155-186. <https://doi.org/10.2308/isys-19-033>.
32. Kaur, J., Lamba, S., Saini, P. 2021. Advanced encryption standard: Attacks and current research trends. In: *2021 International Conference on Advance Computing and Innovative Technologies in Engineering (ICACITE)* (pp. 112-116). Greater Noida: Institute of Electrical and Electronics Engineers. <https://doi.org/10.1109/ICACITE51222.2021.9404716>.

-
33. Raman, R.S., Evdokimov, L., Wurstrow, E., Halderman, J.A., Ensafi, R. 2020. Investigating large scale HTTPS interception in Kazakhstan. In: *IMC '20: Proceedings of the ACM Internet Measurement Conference* (pp. 125-132). New York: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3419394.3423665>.
34. Li, S., Xu, C., Zhang, Y., Du, Y., Chen, K. 2022. Blockchain-based transparent integrity auditing and encrypted deduplication for cloud storage. *IEEE Transactions on Services Computing*, 16(1), 134-146. <https://doi.org/10.1109/TSC.2022.3144430>.
35. Omotunde, H., Ahmed, M. 2023. A comprehensive review of security measures in database systems: Assessing authentication, access control, and beyond. *Mesopotamian Journal of Cyber Security*, 2023, 115-133. <https://doi.org/10.58496/mjcs/2023/016>.
36. Song, L., Garcia-Valls, M. 2022. Improving security of web servers in critical IoT systems through self-monitoring of vulnerabilities. *Sensors*, 22(13), 5004. <https://doi.org/10.3390/s22135004>.
37. Hiremath, P.N., Armentrout, J., Vu., S., Nguyen, T.N., Minh, Q.T., Phung, P.H. 2019. MyWebGuard: Toward a User-Oriented Tool for Security and Privacy Protection on the Web. In: T.K. Dang, J. Küng, M. Takizawa, S. Ha Bui (Eds.), *Proceedings of the 6th International Conference "Future Data and Security Engineering"* (pp. 506-525). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-35653-8_33.
38. Hutt, S., Baker, R.S., Ashenafi, M.M., Andres-Bray, J.M., Brooks, C. 2022. Controlled outputs, full data: A privacy-protecting infrastructure for MOOC data. *British Journal of Educational Technology*, 53(4), 756-775. <https://doi.org/10.1111/bjet.13231>.
39. Al Hawamleh, A.M., Alorfi, Sulaiman M, A., Al-Gasawneh, J.A., Al-Rawashdeh, G. 2020. Cyber security and ethical hacking: The importance of protecting user data. *Solid State Technology*, 63, 7894-7899. <https://solidstatetechnology.us/index.php/JSST/article/view/7202>.
40. Arora, C. 2019. Digital health fiduciaries: Protecting user privacy when sharing health data. *Ethics and Information Technology*, 21(3), 181-196. <https://doi.org/10.1007/s10676-019-09499-x>.
41. Saravanan, N., Umamakeswari, A. 2021. Lattice based access control for protecting user data in cloud environments with hybrid security. *Computers & Security*, 100, 102074. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.102074>.
42. Method and system for verifying the architecture of a software/hardware solution. 2022. <https://patentscope.wipo.int/search/en/detail.jsf?docId=WO2022250564>.

ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (ЗА ВИДАМИ)

UDC 656.022.8:738.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.13>

Drozhzhyn O. L., Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor, Associate Professor at
the Department of Fleet Operation and Sea Transport Technologies
Odesa National Maritime University
ORCID: 0000-0002-9695-9296

IOT IN CONTAINER SHIPPING INDUSTRY: APPLICATIONS AND EXAMPLES OF SOLUTIONS

The study analyzes the participation of technologies related to the development of the Internet of Things (IoT) network concept in the intermodal container transportation system. Since the beginning of the XXI century, IoT-related technologies have been dynamically spreading in almost all areas of international business, and this has changed the understanding of cargo owners about the quality of transportation services, among other things. Since transparency in monitoring the location of high-value goods is extremely important for transport companies, cargo owners, and all other stakeholders, and the intermodal transportation system is extremely complex due to the number and diversity of communications, the need to use IoT is obvious. As analysts predict that the introduction of IoT technologies in containerization will become widespread in the coming years, a study to assess the level of research on the introduction of such technologies and implementation in the practical activities of transport enterprises is relevant. The aim of the proposed review is to determine the degree of IoT implementation in the container transportation industry, areas of research on the topic, and identify factors that may impede the predicted rapid development of IoT in containerization. The proposed study includes an analysis of scientific publications related to the use of the Internet of Things in the field of international container transportation, identifies the main priority areas of such publications, establishes the areas of current implementation of IoT technology and determines the prospects for its use. Since the solutions that can potentially be obtained with the help of IoT are quite heterogeneous, the literature analysis is organized by grouping such publications into the following areas: container monitoring and tracking, enhancing supply chain transparency and visibility, optimization of operational efficiency, security and risk management, environmental impact and sustainability, challenges and barriers. The paper provides examples of online platforms and applications currently offered by major container operators that are related to this technology.

Key words: container, shipping, intermodal, transport, internet of things, IoT.

Дрожжжин О. Л. «Интернет речей» в галузі контейнерних перевезень: сфери застосування та приклади рішень

В статті представлений аналіз участі технологій, які пов'язані з розвитком залучення мережевої концепції «Интернет речей» (англ. IoT) в системі інтермодальних контейнерних перевезень. Технології, пов'язані з IoT з початку XXI сторіччя динамічно ширяться майже в усіх сферах міжнародного бізнесу, і це певним чином змінило розуміння вантажовласників про якість транспортного обслуговування в тому числі. Оскільки прозорість моніторингу перебування високовартісних товарів є вкрай важливою для транспортних підприємств, вантажовласників, і усіх інших зацікавлених сторін, а інтермодальна система перевезень є вкрай складною внаслідок кількості і різнохарактерності комунікацій, необхідність залучення IoT є очевидною. Оскільки аналітиками прогнозується, що впровадження технологій Інтернету речей у контейнеризації стане загальноживим у найближчі роки, дослідження з оцінки рівня вивченості щодо впровадження таких технологій та імплементації в практичній діяльності транспортних підприємств є актуальною. Мета запропонованого огляду полягає в визначенні ступеню запровадженості IoT в контейнерну індустрію перевезень, напрямків наукових досліджень за темою та виявленні факторів, які можуть перешкодити прогнозованому швидкому розвитку IoT у контейнеризації. Запропоноване дослідження включає в себе аналіз наукових публікацій, які стосуються використання «інтернету речей» в сфері міжнародних контейнерних перевезень, визначає основні пріоритетні напрямки таких публікацій, встановлює сфери сучасної імплементації технології IoT і визначає перспективи її використання. Оскільки рішення, які потенційно може бути отримано за допомогою IoT є достатньо різнорідними, аналіз літератури побудований групуванням таких публікацій за напрямками: моніторинг та відстеження контейнерів, підвищення прозорості ланцюгів поставок, оптимізація операційної ефективності, безпека та управління ризиками, вплив на навколишнє середовище та сталий розвиток, виклики та перепони. В роботі зазначені приклади інтернет-платформ, додатків, які сьогодні пропонуються потужними контейнерними операторами, які пов'язані із зазначеною технологією.

Ключові слова: контейнер, судноплавство, інтермодальні перевезення, транспорт, інтернет речей, IoT.

Introduction. The IoT has transformed various industries, and container shipping is no exception. Container shipping involves the global transport of goods in standardized containers, a process characterized by complexity, vast supply chains, and stringent time-sensitive requirements. IoT technology, by facilitating real-time tracking, data collection, and automated operations, has emerged as a significant enabler of efficiency, transparency, and innovation in this field. This review aims to synthesize key themes and findings from the scientific literature on IoT applications in container shipping.

The application of IoT in the container industry can be traced back to the early 2000's when global trade began to witness rapid growth in containerized shipping. Traditionally, container transportation relied heavily on manual processes and basic tracking systems, making it difficult to obtain real-time data about the location, condition, and security of containers.

Initial efforts to integrate IoT involved using Radio Frequency Identification (RFID) tags to track containers. RFID technology allowed for automated identification and data capture, but it had limitations regarding the range of communication and lack of real-time updates. At the same time, the development of GPS tracking systems provided an early method for monitoring container movements but was often limited to high-value cargo.

By the late 2000s, advancements in wireless communication technologies and sensor devices enabled the industry to explore more sophisticated IoT applications. The ability to install low-cost sensors on containers, paired with cellular, satellite, and wireless network technologies, laid the foundation for real-time data collection and remote monitoring, ushering in the era of «smart containers».

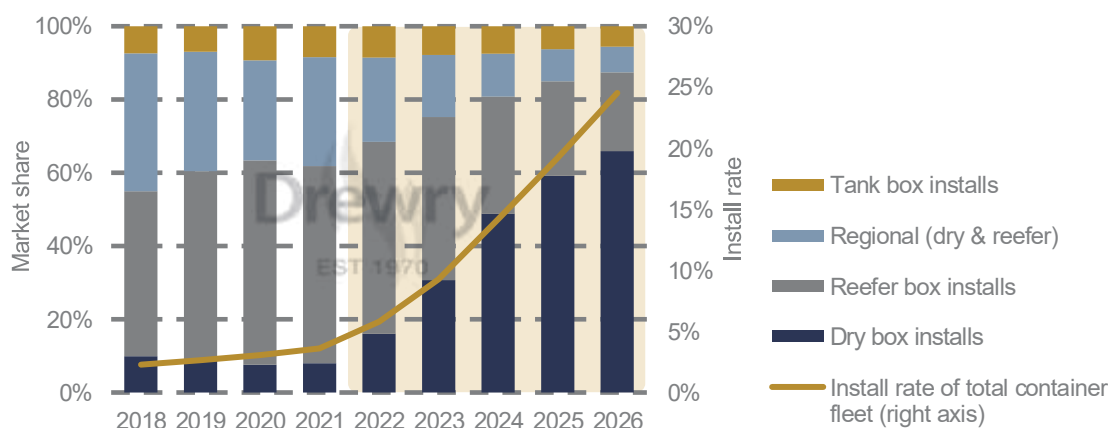


Fig. 1. IoT in Container Shipping development forecast

Source: Drewry [1]

As predicted by Drewry Agency, the number of smart containers in the global fleet will grow to more than 8.7 mln. TEU by 2026, accounting for up to 25 % of global container volumes. It is expected that the development of IoT technologies over time will increase the value of IOT-devices for carriers, operators and cargo owners will reduce the cost of the devices [1].

The purpose of the article. The adoption of IoT technologies in containerization is expected to become ubiquitous in the coming years, so assessing the level of research into the adoption of such technologies and implementation in practice is relevant. The purpose of the proposed review was to identify the extent of IoT implementation in container industry, to determine the degree of scientific study on application areas, and to try to identify factors that may hinder the rapid development of IoT in containerization.

The main material. The expansion of IoT applications in the container industry over the last decade has been driven by several factors, including advancements in connectivity (such as 4G/5G networks), cloud computing, big data analytics, and the demand for real-time supply chain visibility. The key applications of IoT in container shipping can be categorized into the following:

Real-Time Tracking and Monitoring. IoT sensors embedded within containers allow operators to monitor their location, movement, and environmental conditions in real time. This is crucial for industries that deal with perishable goods, pharmaceuticals, and high-value cargo that require strict temperature and humidity control. Smart containers equipped with GPS sensors, temperature sensors, and accelerometers provide real-time data on location, cargo status, and environmental conditions, enabling proactive decision-making in case of deviations.

Supply Chain Optimization. IoT helps optimize logistics processes by providing end-to-end visibility of the supply chain. Real-time data on container movements help shipping companies and logistics providers optimize routes, manage fuel consumption, and avoid delays caused by congested ports or other disruptions. Predictive analytics, powered by IoT data, can forecast demand, allowing better management of container fleets and improving asset utilization.

Security and Risk Management. Security concerns in container shipping, such as cargo theft, smuggling, and damage, have long been a challenge. IoT devices help mitigate these risks by providing enhanced security features. Smart locks, intrusion detection sensors, and geofencing technology enable operators to monitor for unauthorized access or tampering with containers. In the case of hazardous goods, sensors can also detect leaks or temperature changes that might pose safety risks.

Automation and Efficiency. The integration of IoT into ports and terminals has streamlined operations through automation. IoT-enabled cranes, container handling equipment, and automated guided vehicles (AGVs) at smart ports reduce labor costs, increase throughput, and minimize human error. Additionally, IoT facilitates faster customs clearance processes by providing authorities with real-time data on container contents and movements, improving the overall efficiency of global trade.

While IoT has significantly improved the container industry, several challenges remain:

- connectivity issues: despite advances in communication technologies, containers often pass through remote areas (e.g., during ocean transit) where network coverage is limited or unreliable. Satellite connectivity, though available, can be costly and may not be feasible for all operators.

- data overload and integration: the vast amount of data generated by IoT sensors can be overwhelming if not properly managed. Integration of IoT data into existing logistics management systems is another challenge, particularly for smaller companies with limited technological infrastructure.

- cybersecurity risks: as more containers become connected to the internet, cybersecurity threats increase. IoT devices are vulnerable to hacking, which could lead to theft, disruptions in supply chains, or tampering with critical data.

- standardization: the lack of industry-wide standards for IoT devices, protocols, and data formats complicates the interoperability between different stakeholders in the shipping ecosystem. This can lead to fragmented solutions that hinder the seamless flow of information across the supply chain.

Literature survey.

One of the first research articles on the application of IoT in shipping and intermodal transportation is a 2010 study that describes the implementation of telematics technologies to improve the management of cargo operations using IoT. The article touches on aspects such as real-time monitoring of containers using RFID and sensor technologies to help improve transparency and efficiency in supply chains [2].

To streamline the literature analysis, we will divide them into 7 groups, according to the directions of research in this field: 1). container monitoring and tracking; 2). enhancing supply chain transparency and visibility; 3). optimization of operational efficiency; 4). security and risk management 5). environmental impact and sustainability; 6) challenges and barriers.

Container Monitoring and Tracking. One of the most immediate and impactful applications of IoT in container shipping is real-time tracking and monitoring. IoT-enabled sensors are embedded in containers to provide real-time data on location, temperature, humidity, and security status. This capability is particularly valuable for sensitive cargo, such as pharmaceuticals and perishable goods.

The key results in this sector are as follows: IoT enables precise container tracking across oceans and international borders, thus reducing delays and improving logistics management [3]. IoT sensors help in ensuring compliance with international regulations related to the transport of sensitive materials, especially by maintaining optimal temperature ranges during transit [4]. Predictive analytics derived from IoT data can anticipate delays and mitigate disruptions by suggesting alternate routes or adjustments to scheduling [5].

Enhancing Supply Chain Transparency and Visibility. IoT plays a vital role in enhancing supply chain visibility. It enables real-time communication among stakeholders, including shippers, carriers, port operators, and customs authorities, fostering a more integrated and transparent supply chain network. The main conclusions on this direction are proved in scientific articles in the works: enhanced visibility allows stakeholders to monitor the exact movement of goods, leading to reduced instances of cargo theft, misplacement, or delays at checkpoints [6]. Supply chain visibility offered by IoT has shown to improve inventory management and demand forecasting, reducing overstocking or understocking issues [7]. IoT facilitates blockchain applications in shipping, which improve trust, transparency, and the traceability of goods across the supply chain [8].

Optimization of Operational Efficiency. Another major benefit of IoT in container shipping is the optimization of operations through data-driven insights. Smart ports, automated cranes, and container-handling equipment integrated with IoT technologies streamline processes, thus reducing operational inefficiencies. The integration of IoT with artificial intelligence (AI) and machine learning (ML) allows for more efficient loading and unloading processes by forecasting peak times and allocating resources accordingly [9]. Automated guided vehicles (AGVs) used in ports, powered by IoT, reduce human intervention and improve safety while enhancing throughput [10]. IoT data supports predictive maintenance, reducing equipment downtime by preemptively identifying potential mechanical failures in ships and port infrastructure [11].

Security and Risk Management. The container shipping industry faces various security challenges, from piracy and theft to container tampering. IoT technologies can mitigate these risks by offering real-time monitoring and alerts. IoT-enabled seals and locks equipped with sensors can detect and report unauthorized access or tampering

during shipment [12]. Risk management is enhanced through early warning systems that monitor environmental factors, such as storms or sea conditions, allowing vessels to avoid hazardous routes [13]. IoT systems also aid in ensuring the safety of crew and assets by integrating with maritime safety systems to monitor ship stability and provide alerts about potential safety risks [14].

Environmental Impact and Sustainability. Sustainability is an increasingly important issue in global shipping. IoT has shown promise in reducing the environmental footprint of container shipping by enabling smarter resource management and more efficient fuel use. The conclusions of this research area are as follows: IoT sensors monitor fuel consumption and engine performance, enabling shipping companies to optimize routes, reduce fuel usage, and minimize emissions [15]. Smart containers equipped with IoT devices help in the efficient loading of ships, reducing ballast water use [16] and lowering the overall energy consumption per voyage (17). IoT-enabled waste and emissions monitoring systems ensure that ships comply with international environmental regulations, such as the International Maritime Organization's (IMO) emissions standards [18].

Challenges and Barriers. Despite the numerous advantages, several barriers limit the widespread adoption of IoT in container shipping, including data security concerns, the high cost of implementation, and interoperability issues. The researchers' main findings are: data security is a significant challenge, as IoT systems are vulnerable to cyber-attacks, including hacking and data breaches. Encryption and other cybersecurity measures are critical for protecting sensitive shipment data [19]. A lack of standardization in IoT technologies across countries and ports limits the seamless integration of systems, which hampers the full potential of IoT-enabled global logistics [21].

Recognizing the rapid pace of IoT development, some researchers give an estimate for future directions of IoT implementation. The literature suggests that the future of IoT in container shipping will involve more widespread adoption of smart ports, integration with other emerging technologies like blockchain and AI, and increased focus on sustainability and resilience. Smart ports, equipped with IoT, AI, and 5G technologies, are likely to become the norm, facilitating faster and more secure processing of containers [22]. Continued advancements in IoT security protocols and standardized frameworks will make global IoT systems more interoperable and scalable [21]. There is potential for IoT-enabled systems to help container shipping adapt to global challenges, such as climate change and pandemics, by providing more resilient and adaptive supply chain networks [23].

IoT's implementation areas. The IoT plays a transformative role in intermodal transport, which involves the seamless movement of goods across multiple modes of transportation (e.g., ships, trucks, trains). IoT technologies are used to enhance visibility, efficiency, safety, and overall operational effectiveness across the logistics chain. Below are key IoT applications in intermodal transport (fig. 2).

Real-Time Tracking and Monitoring. IoT-enabled devices like GPS sensors, RFID tags, and telematics systems allow for real-time tracking of cargo and vehicles throughout the intermodal network. This data provides: accurate location of goods in transit, condition monitoring for perishable or sensitive items (e.g., temperature, humidity, vibrations), timely alerts for delays, route changes, or cargo theft, enabling proactive responses (fig. 3).

Asset Management. Intermodal transport requires efficient use of assets such as containers, trailers, and railcars. IoT helps by: tracking container utilization to prevent idle assets and optimize space, monitoring wear and tear of equipment, enabling predictive maintenance and minimizing downtime, automating inventory updates, which helps operators avoid loss and theft.

Fleet Management. IoT solutions improve fleet management by: optimizing routes through real-time traffic data and weather conditions, reducing fuel consumption and delivery times, monitoring vehicle health via sensors that track engine performance, tire pressure, and other critical parameters, reducing breakdowns and maintenance costs, driver behavior analysis, promoting safe driving practices and reducing accidents.

Automation and Smart Warehousing. IoT plays a role in automated handling of goods and warehouse operations: automated loading and unloading processes using IoT-linked robots and sensors, smart inventory management through IoT-enabled systems that track goods entering and leaving warehouses in real time, minimizing manual labor, dynamic storage allocation based on the type of goods, temperature requirements, or shipment schedules.

Smart Port and Terminal Operations. In seaports and rail terminals, IoT enhances operational efficiency by: automating container handling through smart cranes and IoT-connected equipment, predictive maintenance of port machinery based on sensor data to minimize equipment failures, optimizing traffic flow within the terminal by monitoring the movement of vehicles and coordinating load scheduling.

Data Analytics for Decision-Making. IoT generates massive volumes of data that can be used for: predictive analytics, forecasting delays or disruptions in transport based on historical patterns, optimizing supply chain networks by analyzing bottlenecks and inefficiencies in real time, improving customer satisfaction through data-driven insights that enhance delivery accuracy and speed.

Environmental Monitoring and Sustainability. IoT is crucial for improving sustainability in intermodal transport by: monitoring emissions and optimizing fuel usage, leading to reduced environmental impact, energy-efficient route planning, which minimizes unnecessary detours and fuel consumption, smart containers that maintain optimal conditions for perishable goods, reducing spoilage and waste.

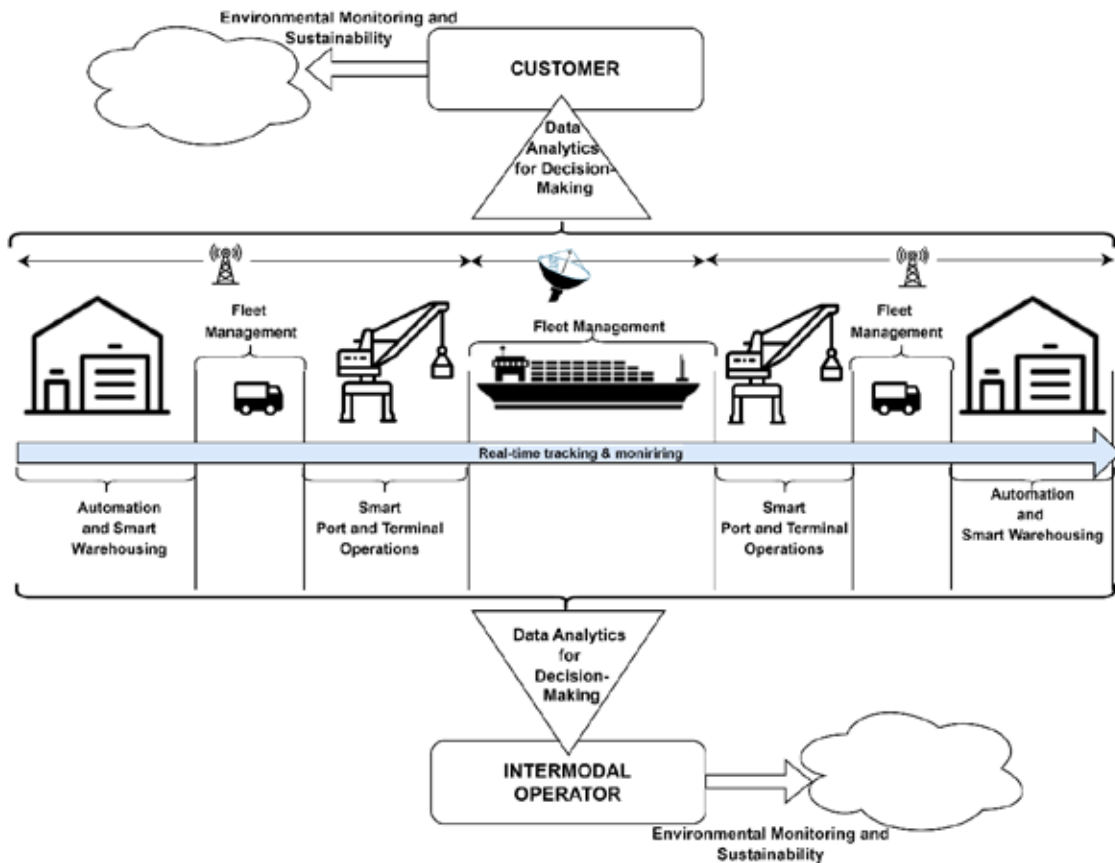


Fig. 2. IoT's implementation areas in containerization

Source: Compiled by the author



Fig. 3. Container IoT sensors data output

Source: Compiled by the author based on [25-31]

Security Enhancements. IoT systems contribute to higher security standards in intermodal transport by: enabling geofencing, where alerts are triggered if a vehicle or container deviates from its pre-set route, monitoring cargo conditions, such as tampering or unauthorized access to goods, biometric or RFID-based access control for secure areas in transport hubs, enhancing cargo security.

Collaborative Networks. IoT connects stakeholders across the intermodal transport network (shipping companies, port operators, rail companies, truck fleets) for better coordination: information sharing through IoT platforms that allow real-time data exchange. Integration of different systems, enabling end-to-end tracking across multiple transport modes, collaborative planning using shared data to optimize shipping schedules and cargo handling. So, IoT applications make intermodal transport smarter, more efficient, and responsive, significantly enhancing global supply chain operations.

IoT-technology practical implementation. The intermodal transportation companies (global forwarders, container operators, NVOCC) each use a variety of IoT products and solutions to monitor freight, vehicles, and optimize operations. Here are examples of specific IoT products and technologies used by leading companies in the industry:

Maersk uses its own RCM system to monitor refrigerated containers. It incorporates IoT sensors to measure temperature, humidity and location in real time. This data is transmitted via satellite communication for analysis and control [31]. The partners of Maersk are AT&T, Ericsson (for data transmission via satellites).

Another major container operator, CMA CGM TRAXENS uses an IoT-solution for container monitoring that provides data on location, shock, vibration, temperature and opening/closing of container doors. It helps to monitor the condition of containers in real time and prevent cargo damage. The technology is based on IoT-based sensors connected via GSM or satellite communication. Other intermodal companies such as MSC, Kuehne+Nagel, Schenker, Bolloré Logistics are also customers of TRAXENS.

Hapag-Lloyd uses IoT to track the temperature and location of containers. The system helps customers get real-time data on the status of transportation, which is especially important for perishable goods. Hapag uses IoT devices made by Orbcomm and Nexxiot to provide customers with container location information through its «Live Position» digital tool. The tracking service is free of charge when Hapag acts as a Carrier's Haulage, and costs 15 USD as a special fee (LPC) for cases when the client organizes ground transportation on their own (Merchant's Haulage).

UPS uses a product ORION (On-Road Integrated Optimization and Navigation), an IoT-based system that analyzes real-time data to optimize delivery routes. It reduces fuel costs and delivery time, improving the efficiency of UPS operations. The technology includes GPS sensors, vehicle condition sensors, and machine learning algorithms [30].

Kuehne+Nagel's IoT-enabled platform that provides real-time visibility of shipments across all transport modes. It leverages IoT sensors to collect data on the exact location, environmental conditions (temperature, humidity), and the security status of goods. It allows customers to track their cargo in real-time, offering greater transparency and control throughout the supply chain. This logistic company has introduced IoT-enabled smart containers to monitor cargo during ocean freight. These containers are equipped with sensors that track real-time data on temperature, location, and movement. This is particularly important for industries requiring high levels of security or specific environmental conditions, like food and beverages or pharmaceuticals.

Conclusions. As a result of analyzing the scientific literature and examples of technology use, several conclusions can be drawn. Both of them lie on a purely technical level: since the sensor is mounted locally inside the container (e.g. at the container's door), how much the sensor readings reflect the situation in the container as a whole. Considering the cost of the devices or ordering a monitoring service from the carrier, the need for multiple sensors inside a single container to adequately display data can be a serious problem for highly sensitive goods transportation or for smaller transportation companies (or cargo owners).

The lag between the development of standards and the practical application of IoT is a serious threat to the container industry, as the lack of standards makes it difficult for different devices and systems in the system to communicate and work together seamlessly. Because IoT devices are manufactured by different companies and can use a wide range of communication protocols and data formats, making it difficult to develop a single standard that will work across all devices. The lack of standardization creates interoperability issues that can lead to compatibility problems and limited functionality.

Bibliography:

1. *Smart container fleet to expand 8-fold over the next 5 years.* (2022, June 23). Drewry. <https://www.drewry.co.uk/maritime-research-opinion-browser/maritime-research-opinions/smart-container-fleet-to-expand-8-fold-over-the-next-5-years>
2. Becker M, Wenning B-L, Görg C, Jedermann R, Timm-Giel A (2010) Logistic applications with wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 6th workshop on hot topics in embedded networked sensors–HotEmNets '10*. ACM Press, Killarney, Ireland, p 1. <https://doi.org/10.1145/1978642.1978650>
3. Choi, H. R., Moon, Y. S., Kim, J. J., Lee, J. K., Lee, K. B., & Shin, J. J. (2017). Development of an IoT-based container tracking system for China's Belt and Road (B&R) initiative. *Maritime Policy & Management*, 45(3), 388–402. <https://doi.org/10.1080/03088839.2017.1400190>
4. Pajic, V., Andrejic, M., & Chatterjee, P. (2024). Enhancing cold chain logistics: A framework for advanced temperature monitoring in transportation and storage. *Mechatron. Intell Transp. Syst*, 3(1), 16-30.

-
5. Tran-Dang, H., Krommenacker, N., Charpentier, P., & Kim, D. S. (2020). The Internet of Things for Logistics: Perspectives, Application Review, and Challenges. *IETE Technical Review*, 39(1), 93–121. <https://doi.org/10.1080/02564602.2020.1827308>
 6. Hiekata, K., Wanaka, S., Mitsuyuki, T., Ueno, R., Wada, R., & Moser, B. (2021). Systems analysis for deployment of internet of things (IoT) in the maritime industry. *Journal of Marine Science and Technology*, 26, 459-469.
 7. Weißhuhn, S., & Hoberg, K. (2021). Designing smart replenishment systems: Internet-of-Things technology for vendor-managed inventory at end consumers. *European Journal of Operational Research*, 295(3), 949-964.
 8. Rejeb, A., Keogh, J. G., & Treiblmaier, H. (2019). Leveraging the internet of things and blockchain technology in supply chain management. *Future Internet*, 11(7), 161.
 9. Chatterjee, I., & Cho, G. (2022). Port Container Terminal Quay Crane Allocation Based on Simulation and Machine Learning Method. *Sensors & Materials*, 34.
 10. Tsolakis, N., Zissis, D., Papaefthimiou, S., & Korfiatis, N. (2022). Towards AI driven environmental sustainability: an application of automated logistics in container port terminals. *International Journal of Production Research*, 60(14), 4508-4528.
 11. Durlík, I., Miller, T., Cembrowska-Lech, D., Krzemińska, A., Złoczowska, E., & Nowak, A. (2023). Navigating the sea of data: a comprehensive review on data analysis in maritime IoT applications. *Applied Sciences*, 13(17), 9742.
 12. Moon, Y. S., Lee, E. K., Kim, J. J., & Choi, H. R. (2014). A Study on the Outer Container Security Device Based on IoT. *International Information Institute (Tokyo). Information*, 17(11), 5407.
 13. Aslam, S., Michaelides, M. P., & Herodotou, H. (2020). Internet of ships: A survey on architectures, emerging applications, and challenges. *IEEE Internet of Things journal*, 7(10), 9714-9727.
 14. Mammadova, M., Jabrayilova, Z. (). Decision making in an intelligent health management system of the ship crew in maritime transport. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Problems of Logistics, Management and Operation in The East-West Transport Corridor (PLMO 2023)*. Baku, Azerbaijan, p. 1-10. <https://doi.org/10.54381/plmo2023.18>
 15. Tran, T. A. (2023). A critical review of using Internet of Things technology for decarbonizing the shipping transportation industry in industrial revolution 4.0. *Recent Advancement of IoT Devices in Pollution Control and Health Applications*, 53-63.
 16. Komathy, K. (2020). Ballast Water Quality Compliance Monitoring Using IoT. In *Information and Communication Technology for Sustainable Development: Proceedings of ICT4SD 2018* (pp. 443-451). Springer Singapore.
 17. Tran T. (2022) Building the remote surveying system of energy consumption in maritime transportation using internet of things (IoT) technique. In: Fathi M, Zio E, Pardalos PM (eds) Handbook of smart energy systems. Springer, Cham, pp 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72322-4_130-1.
 18. Permalá, A., Scholliers, J., & Granqvist, J. (2001). Intelligent transport unit simplifies identification process. *Nordic Road and Transport Research*, (1), 12-13.
 19. Deng, J., Zeng, J., Mai, S., Jin, B., Yuan, B., You, Y., ... & Yang, M. (2021). Analysis and prediction of ship energy efficiency using 6G big data internet of things and artificial intelligence technology. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 12(4), 824-834.
 20. Ashraf, I., Park, Y., Hur, S., Kim, S. W., Alroobaea, R., Zikria, Y. B., & Nosheen, S. (2022). A survey on cyber security threats in IoT-enabled maritime industry. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(2), 2677-2690.
 21. Al-Qaseemi, S.A., Almulhim, H.A., Almulhim, M.F., & Chaudhry, S.R. (2016, December). IoT architecture challenges and issues: Lack of standardization. In *2016 Future technologies conference (FTC)* (pp. 731-738). IEEE.
 22. Cavalli, L., Lizzi, G., Guerrieri, L. et al. Addressing Efficiency and Sustainability in the Port of the Future with 5G: The Experience of the Livorno Port. A Methodological Insight to Measure Innovation Technologies' Benefits on Port Operations. *Sustainability* 2021, 13, 12146. <https://doi.org/10.3390/su132112146>
 23. Agrawal, S., Agrawal, R., Kumar, A., Luthra, S., & Garza-Reyes, J. A. (2024). Can industry 5.0 technologies overcome supply chain disruptions? – a perspective study on pandemics, war, and climate change issues. *Operations Management Research*, 17(2), 453-468.
 24. Frye, C. (2018, August 28). *Evolution of IoT in shipping: current and future trends*. The Kolabtree Blog. <https://www.kolabtree.com/blog/evolution-of-iot-and-shipping-current-and-future-trends/>
 25. *About Hapag-Lloyd LIVE – Reefer – Hapag-Lloyd*. (n.d.). <https://www.hapag-lloyd.com/en/services-information/cargo-fleet/container-monitoring/hapag-lloyd-live-reefer.html>
 26. *IoT sensors*. (n.d.). Maersk Innovation Center. <https://innovation.maersk.com/innovations/iot-sensors>
 27. MSC. (2018, December 13). *MSC and Traxens Launch IoT Pilot Project to Improve Terminal Efficiency*. MSC. <https://www.msc.com/en/newsroom/news/2018/december/msc-and-traxens-launch-iot-pilot-project-to-improve-terminal-efficiency>
-

-
28. Uehlein, A. (2021, April 8). *Internet of Things in logistics – a business opportunity* | *Logistics Matters*. Logistics Matters. <https://blog.dbschenker.com/internet-of-things-in-logistics/>
 29. Kuehne+Nagel. (2023, January 16). Internet of Things sensors – Monitoring the condition of your goods. *Kuehne + Nagel*. <https://home.kuehne-nagel.com/en/-/knowledge/market-insights/internet-of-things-sensors>
 30. *UPS to enhance ORION with continuous delivery route Optimization* | *About UPS*. (n.d.). About UPS-US. <https://about.ups.com/us/en/newsroom/press-releases/innovation-driven/ups-to-enhance-orion-with-continuous-delivery-route-optimization.html>
 31. *Services*. (n.d.). Remote Container Management | Maersk. <https://www.maersk.com/digital-solutions/captain-peter/services>

References:

1. *Smart container fleet to expand 8-fold over the next 5 years*. (2022, June 23). Drewry. <https://www.drewry.co.uk/maritime-research-opinion-browser/maritime-research-opinions/smart-container-fleet-to-expand-8-fold-over-the-next-5-years>
2. Becker M, Wenning B-L, Görg C, Jedermann R, Timm-Giel A (2010) Logistic applications with wireless sensor networks. In: *Proceedings of the 6th workshop on hot topics in embedded networked sensors–HotEmNets '10*. ACM Press, Killarney, Ireland, p 1. <https://doi.org/10.1145/1978642>. 1978650
3. Choi, H. R., Moon, Y. S., Kim, J. J., Lee, J. K., Lee, K. B., & Shin, J. J. (2017). Development of an IoT-based container tracking system for China's Belt and Road (B&R) initiative. *Maritime Policy & Management*, 45(3), 388–402. <https://doi.org/10.1080/03088839.2017.1400190>
4. Pajic, V., Andrejic, M., & Chatterjee, P. (2024). Enhancing cold chain logistics: A framework for advanced temperature monitoring in transportation and storage. *Mechatron. Intell Transp. Syst*, 3(1), 16-30.
5. Tran-Dang, H., Krommenacker, N., Charpentier, P., & Kim, D. S. (2020). The Internet of Things for Logistics: Perspectives, Application Review, and Challenges. *IETE Technical Review*, 39(1), 93–121. <https://doi.org/10.1080/02564602.2020.1827308>
6. Hiekata, K., Wanaka, S., Mitsuyuki, T., Ueno, R., Wada, R., & Moser, B. (2021). Systems analysis for deployment of internet of things (IoT) in the maritime industry. *Journal of Marine Science and Technology*, 26, 459-469.
7. Weißhuhn, S., & Hoberg, K. (2021). Designing smart replenishment systems: Internet-of-Things technology for vendor-managed inventory at end consumers. *European Journal of Operational Research*, 295(3), 949-964.
8. Rejeb, A., Keogh, J. G., & Treiblmaier, H. (2019). Leveraging the internet of things and blockchain technology in supply chain management. *Future Internet*, 11(7), 161.
9. Chatterjee, I., & Cho, G. (2022). Port Container Terminal Quay Crane Allocation Based on Simulation and Machine Learning Method. *Sensors & Materials*, 34.
10. Tsolakis, N., Zisis, D., Papaefthimiou, S., & Korfiatis, N. (2022). Towards AI driven environmental sustainability: an application of automated logistics in container port terminals. *International Journal of Production Research*, 60(14), 4508-4528.
11. Durlík, I., Miller, T., Cembrowska-Lech, D., Krzemińska, A., Złoczowska, E., & Nowak, A. (2023). Navigating the sea of data: a comprehensive review on data analysis in maritime IoT applications. *Applied Sciences*, 13(17), 9742.
12. Moon, Y. S., Lee, E. K., Kim, J. J., & Choi, H. R. (2014). A Study on the Outer Container Security Device Based on IoT. *International Information Institute (Tokyo). Information*, 17(11), 5407.
13. Aslam, S., Michaelides, M. P., & Herodotou, H. (2020). Internet of ships: A survey on architectures, emerging applications, and challenges. *IEEE Internet of Things journal*, 7(10), 9714-9727.
14. Mammadova, M., Jabrayilova, Z. (). Decision making in an intelligent health management system of the ship crew in maritime transport. In: *Proceedings of 2nd International Conference on Problems of Logistics, Management and Operation in The East-West Transport Corridor (PLMO 2023)*. Baku, Azerbaijan, p. 1-10. <https://doi.org/10.54381/plmo2023.18>
15. Tran, T. A. (2023). A critical review of using Internet of Things technology for decarbonizing the shipping transportation industry in industrial revolution 4.0. *Recent Advancement of IoT Devices in Pollution Control and Health Applications*, 53-63.
16. Komathy, K. (2020). Ballast Water Quality Compliance Monitoring Using IoT. In *Information and Communication Technology for Sustainable Development: Proceedings of ICT4SD 2018* (pp. 443-451). Springer Singapore.
17. Tran T. (2022) Building the remote surveying system of energy consumption in maritime transportation using internet of things (IoT) technique. In: Fathi M, Zio E, Pardalos PM (eds) *Handbook of smart energy systems*. Springer, Cham, pp 1–14. https://doi.org/10.1007/978-3-030-72322-4_130-1.
18. Permala, A., Scholliers, J., & Granqvist, J. (2001). Intelligent transport unit simplifies identification process. *Nordic Road and Transport Research*, (1), 12-13.

-
19. Deng, J., Zeng, J., Mai, S., Jin, B., Yuan, B., You, Y., ... & Yang, M. (2021). Analysis and prediction of ship energy efficiency using 6G big data internet of things and artificial intelligence technology. *International Journal of System Assurance Engineering and Management*, 12(4), 824-834.
 20. Ashraf, I., Park, Y., Hur, S., Kim, S. W., Alroobaea, R., Zikria, Y. B., & Nosheen, S. (2022). A survey on cyber security threats in IoT-enabled maritime industry. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 24(2), 2677-2690.
 21. Al-Qaseemi, S. A., Almulhim, H. A., Almulhim, M. F., & Chaudhry, S. R. (2016, December). IoT architecture challenges and issues: Lack of standardization. In *2016 Future technologies conference (FTC)* (pp. 731-738). IEEE.
 22. Cavalli, L., Lizzi, G., Guerrieri, L. et al. Addressing Efficiency and Sustainability in the Port of the Future with 5G: The Experience of the Livorno Port. A Methodological Insight to Measure Innovation Technologies' Benefits on Port Operations. *Sustainability* 2021, 13, 12146. <https://doi.org/10.3390/su132112146>
 23. Agrawal, S., Agrawal, R., Kumar, A., Luthra, S., & Garza-Reyes, J. A. (2024). Can industry 5.0 technologies overcome supply chain disruptions? – a perspective study on pandemics, war, and climate change issues. *Operations Management Research*, 17(2), 453-468.
 24. Frye, C. (2018, August 28). *Evolution of IoT in shipping: current and future trends*. The Kolabtree Blog. <https://www.kolabtree.com/blog/evolution-of-iot-and-shipping-current-and-future-trends/>
 25. *About Hapag-Lloyd LIVE – Reefer – Hapag-Lloyd*. (n.d.). <https://www.hapag-lloyd.com/en/services-information/cargo-fleet/container-monitoring/hapag-lloyd-live-reefer.html>
 26. *IoT sensors*. (n.d.). Maersk Innovation Center. <https://innovation.maersk.com/innovations/iot-sensors>
 27. MSC. (2018, December 13). *MSC and Traxens Launch IoT Pilot Project to Improve Terminal Efficiency*. MSC. <https://www.msc.com/en/newsroom/news/2018/december/msc-and-traxens-launch-iot-pilot-project-to-improve-terminal-efficiency>
 28. Uehlein, A. (2021, April 8). *Internet of Things in logistics – a business opportunity | Logistics Matters*. Logistics Matters. <https://blog.dbschenker.com/internet-of-things-in-logistics/>
 29. Kuehne+Nagel. (2023, January 16). Internet of Things sensors – Monitoring the condition of your goods. *Kuehne + Nagel*. <https://home.kuehne-nagel.com/en/-/knowledge/market-insights/internet-of-things-sensors>
 30. *UPS to enhance ORION with continuous delivery route Optimization | About UPS*. (n.d.). About UPS-US. <https://about.ups.com/us/en/newsroom/press-releases/innovation-driven/ups-to-enhance-orion-with-continuous-delivery-route-optimization.html>
 31. *Services*. (n.d.). Remote Container Management | Maersk. <https://www.maersk.com/digital-solutions/captain-peter/services>

Лебідь В. В., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри міжнародних перевезень та митного контролю
Національного транспортного університету
ORCID: 0000-0002-1260-3760

Мейш Ю. А., доктор технічних наук, професор,
професор кафедри вищої та прикладної математики
Національного університету біоресурсів і
природокористування України
ORCID: 000-0001-7492-700X

Копяк Н. В., старший викладач кафедри транспортних технологій
Національного транспортного університету
ORCID: 0000-0001-8539-9193

СТАТИСТИЧНА ОЦІНКА ОКРЕМИХ КВАЛІФІКАЦІЙ МИТНИХ ІНСПЕКТОРІВ ПРИ ОФОРМЛЕННІ МИТНИХ ДЕКЛАРАЦІЙ ЗА ФУНКЦІЄЮ БАЖАНОСТІ ХАРІНГТОНА

В даній роботі використано статистичні дані про оформлені митні документи, на основі яких побудовано економіко-математичну модель кількості оформлених митних документів із застосуванням методів кореляційно-регресійного аналізу за допомогою функціоналу Microsoft Excel. На сьогоднішній день державна політика України у сфері митної справи спрямована на підтримку та розвиток національної економіки та на її інтеграцію у світову економіку. Для захисту національних інтересів України необхідно постійно проводити моніторинг та регулювання зовнішньоторговельних операцій. Кабінет Міністрів України затвердив перелік документів, який необхідний для здійснення митного контролю та митного оформлення товарів і транспортних засобів, що переміщуються через митний кордон України. Державна митна служба України постійно збирає, зберігає, обробляє, аналізує, захищає та поширює офіційну статистичну інформацію про товари, які переміщуються через митний кордон України, що використовуються в даній статті для проведення дослідження. Для митної справи моделювання є необхідним інструментом, який допомагає у визначенні та аналізі характеристик, що являються суттєвими для зовнішньої торгівлі країни. Особливу важливість моделювання має для Державної митної служби України, оскільки до досліджувати процеси зовнішньої торгівлі без необхідності проведення експериментів над нею. Ключовими елементами якісного аналізу та прогнозування є коректна постановка задачі, правильне застосування математичного апарату, дотримання методики проведення статистичних досліджень. Дане дослідження може бути корисним для митної справи, оскільки моделювання є необхідним інструментом, який допомагає у визначенні та аналізі характеристик, що являються суттєвими для зовнішньої торгівлі країни. Отримані результати мають важливе прикладне значення та дозволяють виконувати планування обсягів внутрішньої та зовнішньої торгівлі України на наступний період.

Ключові слова: митні документи, математичний апарат, функція бажаності Харінгтона, прогнозування, статистичні дослідження.

Lebid V. V., Meish Yu. A., Kopyak N. V. Statistical assessment of individual qualifications of customs inspectors in the processing customs declarations based on the harington desirability function

This study utilizes statistical data on processed customs documents to develop an econometric model of the number of processed customs documents using correlation-regression analysis methods and Microsoft Excel tools. This study will be useful for customs affairs considering that modeling is a necessary tool which assists in identifying and analyzing the essential characteristics for a country's foreign trade. Modeling is a crucial tool in customs affairs, as it helps to identify and analyze essential characteristics for the country's foreign trade. Modeling is particularly important for the State Customs Service of Ukraine, as it allows to study the foreign trade processes without direct experimentation. Today the main aim of Ukraine's state policy in the field of customs affairs is supporting and developing the national economy and integrating it into the global economy. To protect the national interests of Ukraine, it is necessary to continuously monitor and regulate foreign trade operations. The Cabinet of Ministers of Ukraine has approved a list of documents required for customs control and clearance of goods and vehicles crossing the customs border of Ukraine. The State Customs Service of Ukraine constantly collects, stores, processes, analyzes, protects, and disseminates official statistical information on goods moving across the customs border of Ukraine which are used in this article to conduct research. Key elements of high-quality analysis and forecasting include proper problem formulation, the appropriate selection and application of mathematical apparatus, and adherence to the methodology of conducting statistical

research. During this study the special attention was given to determining the reliability of the obtained results and validating the adequacy of the constructed regression model. This, in turn, allows more accurate forecasting of the volume of processed customs documents in the upcoming year. The results obtained serve as an important tool for managing customs policy and planning the volume of Ukraine's internal and external trade for the next period. This enables more efficient resource allocation, development of growth strategies, and optimization of customs procedures, which will facilitate Ukraine's further integration into the global economic system.

Key words: *customs documents, mathematical apparatus, Harrington's desirability function, forecasting, statistical researches.*

Постановка проблеми. З метою забезпечення захисту національних інтересів в Україні впроваджуються різноманітні митні інструменти, одним із яких є митні платежі, які використовуються для митного регулювання зовнішньоекономічної діяльності країни [1]. Митні платежі виступають в якості одного із джерел наповнення державного бюджету України. За даних умов, митниця відіграє важливу роль у якості економічно-фіскального органу, оскільки вона впливає на наповнення державного бюджету країни. Цей фактор вимагає постійного оцінювання, аналізу, прогнозування та корегування функціонуючої системи митно-тарифного регулювання. Такий підхід дозволяє виявляти вплив митно-тарифного регулювання на розвиток зовнішньоекономічних відносин в майбутньому.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Україна має чимало відомих вчених-економістів, які зробили вагомий внесок у розвиток системи оподаткування зовнішньоекономічної діяльності та митної справи. Деякі з них активно залучалися дослідженнями в цих напрямках, впливаючи на подальший розвиток економічної політики країни. Роботи І.Ю. Бураковського охоплюють питання митної політики, зовнішньоекономічних зв'язків та економічної інтеграції. Він активно вивчав вплив митно-тарифної політики на економічний розвиток України та її інтеграцію у світові ринки. Бураковський також був залучений до розробки стратегій щодо лібералізації зовнішньої торгівлі, що сприяло покращенню умов ведення бізнесу та підвищенню конкурентоспроможності України.

Відомі вчені-економісти А. Крисоватий, О. Гребельник, Ю. Іванов, В. Науменко, П. Пашко та інші [10-16] займалися дослідженнями та вдосконаленнями системи оподаткування зовнішньоекономічної діяльності України.

Багато науковців досліджували проблеми використання митних режимів. Зокрема, Р. Лемеха зазначає, що одним із ключових напрямів вдосконалення правового регулювання митних відносин є адаптація українського законодавства до стандартів ЄС, включаючи митні режими.

Н. Осадча та В. Ляшенко пропонують систематизувати митні режими у три групи: ті, що впливають на торговельний баланс, глобалізаційні режими, а також національні митні режими.

Б. Кормич підкреслює важливість наближення митного законодавства України до вимог ЄС, зокрема шляхом внесення змін до Митного кодексу, що включає гармонізацію терміну «митна процедура», замінивши його поточним поняттям «митний режим».

Т. В. Тучак акцентує увагу на тому, що правове регулювання митних режимів у ЄС є більш сприятливим для розвитку експортно орієнтованих галузей, створення нових робочих місць і збільшення податкових надходжень підприємств.

Всі ці вчені зробили суттєвий внесок у дослідження системи оподаткування зовнішньоекономічної діяльності України та розвитку митної справи. Їхні роботи допомогли вдосконалити механізми митного регулювання, що сприяло покращенню торговельних умов для України та підвищенню її економічної інтеграції в глобальні ринки.

Але у проведених дослідженнях не в повній мірі було розглянуто питання податкових наслідків, які виникають при застосуванні певних митних режимів.

Також мають бути деталізовано ризики застосування митних режимів для держава та суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності.

Однак, на сьогодні недостатньо вивченим та дослідженим залишається прогнозування податків-відсплатимитнихплатежів (мито, митний збір, податок на додану вартість), що надходять до державного бюджету України.

У звіті про виконання Плану роботи митниць у розрізі забезпечення індикативних показників доходів та здійснення моніторингу надходжень платежів до бюджету зазначається, що моніторинг надходжень платежів до бюджету здійснюється шляхом щоденного, щотижневого та щомісячного інформування управління адміністрування митних платежів та митно-тарифного регулювання щодо прогнозованих надходжень в розрізі суб'єктів господарювання та очікуваних сум надходжень. Отже прогнозування кількості очікуваних оформлень митних документів на сьогодні є актуальною.

Мета статті. Метою даної роботи є побудова економіко-математичної моделі для прогнозування можливих обсягів оформлення різноманітних митних документів з використанням методів кореляційно-регресійного аналізу статистичних даних, що є в наявності за попередній період.

Виклад основного матеріалу. Від обізнаності митних інспекторів із законодавством до вміння працювати з програмним забезпеченням залежить швидкість та ефективність проходження митних процедур підприємствами, що здійснюють ЗЕД. Кваліфікація митних інспекторів – це важлива складова у співпраці митних органів з підприємствами.

Від уміння та якості роботи митних інспекторів залежить ефективність та професіоналізм роботи митного поста, а також легкість та швидкість митного оформлення для експортерів та імпортерів, з якими співпрацює митний пост.

Щоб детальніше дізнатися про те, яким є рівень кваліфікацій митних інспекторів та чи є такі сфери, у яких їм потрібно вдосконалювати свої знання і взаємодію з бізнес-підприємствами, було проведена оцінка окремих кваліфікацій митних інспекторів на одному з Київських митних постів.

Провести оцінку якості роботи митних інспекторів за певними критеріями достатньо складно. Оскільки сукупну якість роботи митних інспекторів за такими критеріями як: обізнаність із законодавством; здатність працювати з програмним забезпеченням, що здатне виявляти митні ризики; здатність працювати з іншими технічними засобами митного контролю (ваги, сканери, металошукачі, електронні детектори, рентгенівські апарати тощо); здатність професійно та безпомилково здійснювати митне оформлення; здатність відповісти на запитання підприємців, надати необхідну інформацію важко оцінити чисельно, тобто кількісно. Для такої оцінки необхідне опитування респондентів, яке є суб'єктивним.

Складність такої оцінки пов'язана з відсутністю чітких критеріїв виміру, неможливістю у більшості випадків застосування кількісних методів. Треба зазначити, що кожний критерій якості має різну вагу у сукупності досліджуваних факторів кваліфікацій митних інспекторів.

Якість кваліфікацій митних інспекторів при здійсненні митних формальностей умовно можна розділити на дві групи, в залежності від методу їх визначення:

- розрахункові показники – це показники якості, які можна оцінити кількісно (кількість МД, щодо яких за результатами виконання визначених АСУР МФ було виявлено розбіжності та/або невідповідності, порушення);
- експертні показники (культура обслуговування, тобто здатність відповісти на запитання підприємців; здатність надійно працювати з іншими технічними засобами митного контролю; здатність професійно та безпомилково здійснювати митне оформлення), які в більшості випадків кількісно оцінити неможливо, тому виникає необхідність у застосування експертних методів.

Для визначення кількісних показників якості роботи митних інспекторів в роботі пропонується застосувати узагальнену функцію бажаності Харінгтона, суть якої полягає у зведенні якісних критеріїв до кількісного виразу:

$$h(v) = \exp(-\exp(-v_i)) \quad (1)$$

де $h(v)$ – значення функції бажаності для критерія v_i ;

v_i – значення оцінки за шкалою Харінгтона.

Визначення кількісних значень за таким підходом виконується у відповідності з основними методами кваліметрії [22]. Застосування функції бажаності дозволяє звести якісні оцінки якості до кількісних, які знаходяться в інтервалі від 0 ($h_v = 0$, відповідає неприйнятному рівню) до 1 ($h_v = 1$, найкраще значення). Стандартні відмітки на шкалі бажаності представлені в таблиці 1 і відповідають деяким точкам кривої, яка представлена на рис. 1 та задається рівнянням $h_v = (a^{-a})^{-v}$.

Таблиця 1

Відповідність якісних оцінок значенням функції бажаності Харінгтона

Значення меж на інтервалу за шкалою	Оцінка за якісним показником	Значення за шкалою бажаності	
		діапазон	середні значення
3-4	Відмінно	< 0,950	0,975
2-3	Дуже добре	0,875-0,950	0,913
1-2	Добре	0,690-0,875	0,782
0-1	Задовільно	0,367-0,690	0,530
(-1)-0	Погано	0,066-0,367	0,285
(-2)-(-1)	Дуже погано	0,0007-0,066	0,033

Для визначення інтегрального показника якості роботи митних інспекторів київського митного посту необхідно розрахувати вагові коефіцієнти k_i , які враховують ступінь впливу критеріїв на інтегральний показник роботи всього відділу. Вони розраховуються для кількісних та якісних критеріїв з урахуванням їх загального ранжування наступними чином:

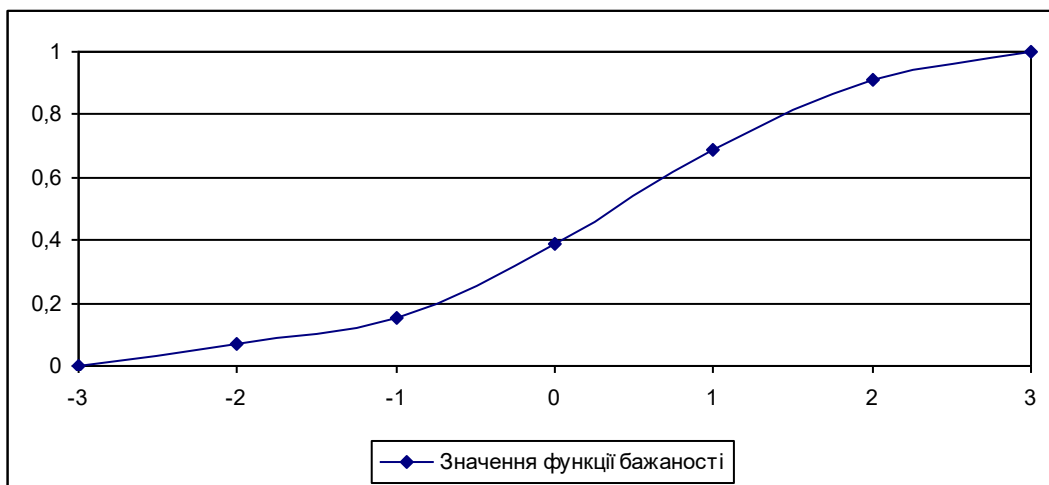


Рис. 1. Функція бажаності Харінгтона

– для лінійної залежності:

$$k_i = \frac{R_i}{\sum_{i=1}^N R_i}, i = 1, \dots, N, \quad (2)$$

де R_i – рейтинг важливості критерію у ранговій послідовності;

– для експоненційної залежності:

$$k_i = \Delta_x \exp(-x_i) \quad (3)$$

де x_i – середина i -го інтервалу; Δ_x – інтервал, що розраховується з урахуванням кількості показників.

Для визначення вагових коефіцієнтів можуть бути використані і інші залежності, зокрема, щільність розподілу ймовірностей (за законом Пуассона, за нормальним законом тощо). Розрахунок вагових коефіцієнтів дає змогу визначити комплексний інтегральний показник:

$$r_i = \sum_{j=1}^N k_j \cdot \alpha_j, i = 1, N \quad (4)$$

Оцінку рівня якості роботи митних інспекторів розглянемо на прикладі однієї з Київських регіональних митниць.

Оцінюючи якість кваліфікації співробітників митниці, маємо набір показників якісного та кількісного характеру, що суттєво ускладнює задачу здійснення оцінки окремих кваліфікацій митних інспекторів за розміром підприємств. (таблиця 2).

Таблиця 2

Значення кількісних та якісних критеріїв роботи митних інспекторів митного посту

Критерії	Одиниці виміру	Митні інспектори		
		№ 1	№ 2	№ 3
1. Кількість проведення митних оглядів	АТЗ/ на добу	6	3	7
2. Загальна кількість МД, по яких АСУР було визначено МФ та по яких зазначено про виконання відповідних МФ	штук	950	870	710
3. Середній час простою в черзі до митного інспектора	хв	120	120	80
4. Здатність професійно та безпомилково здійснювати митне оформлення	$n_{\text{обс}}$	35	12	13
5. Обізнаність митного інспектора із законодавством	так / ні	добре	добре	добре
6. Здатність працювати з програмним забезпеченням з управління ризиками	так / ні	добре	дуже добре	погано

Використовуючи узагальнену функцію бажаності, зведемо якісні критерії до кількісного виразу та представимо узагальнену таблицю кількісних показників з урахуванням рангів кожного критерію (таблиця 3.5).

Таблиця 3

Якісні критерії зведені до кількісних

Критерії	Ранг (R _i)	Митні інспектори		
		№ 1	№ 2	№ 3
1. Кількість проведення митних оглядів	6	16,2	16,2	14,5
2. Загальна кількість МД, по яких АСУР було визначено МФ та по яких зазначено про виконання відповідних МФ	5	14,0	14,0	14,5
3. Середній час простою в черзі до митного інспектора	4	120	120	80
4. Здатність професійно та безпомилково здійснювати митне оформлення	3	35	12	13
5. Обізнаність митного інспектора із законодавством	2	0,69	0,69	0,69
6. Здатність працювати з програмним забезпеченням з управління ризиками	1	0,69	0,87	0,00

Визначивши ваговий коефіцієнт кожного з критеріїв, оцінимо критерії за ступенем важливості; розраховані значення представимо у таблиці 4.

Таблиця 4

Вагові коефіцієнти критеріїв

Критерій	k_1	k_2	k_3	k_4	k_5	k_6
Значення розрахованого коефіцієнту	0,29	0,24	0,19	0,14	0,09	0,04

Застосовуючи представлений математичний апарат, розрахуємо інтегральну оцінку кваліфікацій митних інспекторів, які співпрацюють з підприємствами різних секторів (таблиця 5):

Таблиця 5

Інтегральні оцінки якості роботи митних інспекторів

Інтегральний показник	Митні інспектори		
	№ 1	№ 2	№ 3
r_i	0,86	0,55	0,47

Найнижчий інтегральний показник є за критерієм здатності відповісти на запитання підприємців, надати необхідну додаткову інформацію щодо здійснення митних формальностей. Визначення набору критеріїв, що складають оцінку роботи митних інспекторів, і застосування запропонованого математичного виразу забезпечує достовірність отриманого результату. Отже, узагальнююча функція бажаності Харінгтона є зручним математичним інструментом для визначення інтегрального показника якості кваліфікації митних інспекторів.

Варто відзначити, що опитування українських імпортерів та експортерів, яке проводить Інститут економічних досліджень та політичних консультацій показують, що оцінка вміння митних інспекторів працювати з технічними засобами митного контролю становить 4,4 бала, тоді як малі підприємства поставили в середньому 4,2 бала. Здатність митних інспекторів відповісти на запитання підприємців та надати необхідну інформацію представники виключно експортерів оцінюють в середньому на 4 бали, а респонденти, які представляють бізнес, що лише імпортує, або той, що імпортує та експортує, – на 3,7 бала.

Основними статистичними показниками, що характеризують ефективність роботи митних інспекторів та митних органів в цілому з декларування товарів учасниками зовнішньої економічної діяльності є кількість митних декларацій (МД), оформлених за певний період часу (табл. 6).

Таблиця 6

Кількість оформлених МД протягом 2021 – 2023 років

№	Вид митної декларації	Кількість МД			Кількість суб'єктів ЗЕД	Величина митних платежів, перерахованих до держ. бюджету, млн. грн		
		2021	2022	2023		2021	2022	2023
1	ІМ 40 ДЕ	11460	2644	75	20	761	895	1155
2	ІМ 40 ЕА	2876	1806	3641	20	460	321	536
3	ІМ 40 АА	155	65	32	20	571	689	112

Середня кількість МД, оформлених 1 працівником митниці за аналізований період часу, визначається за формулою (1):

$$\bar{N}_{МД} = \frac{\sum N_{МД}}{T_{сп}} \quad (5)$$

де:

$\sum N_{МД}$ – загальна кількість МД, оформлених за аналізований період митним підрозділом;

$T_{сп}$ – середньооблікова чисельність працівників цього підрозділу за цей період.

Середній час декларування товарів, що визначається за формулою (3.16):

$$\bar{t}_{МД} = \frac{t_{год.}}{\sum N_{МД}}, \quad (6)$$

дет_{год.} – тривалість робочого часу митного підрозділу за аналізований період в годинах, визначається як добуток числа робочих днів за аналізований період і середньої кількості годин роботи за день.

Середня величина митних платежів, що стягуються з однією МД, що визначається за формулою (7):

$$\overline{МП}_{МД} = \frac{\sum МП}{\sum N_{МД}}, \quad (7)$$

де $\sum МП$ – загальна сума митних платежів митного підрозділу за аналізований період.

Кількість робочих днів протягом 2021 – 2023 років не змінювалась – 251 день. Розрахунок статистичних показників, що характеризують роботу митних органів наведено в таблиці 7.

Таблиця 7

Розрахунок показників, що характеризують роботу митних органів протягом 2021 – 2023 років

	Середня кількість МД, шт			Середній час декларування, год		
	2021	2022	2023	2021	2022	2023
ІМ 40 ДЕ*	3820	881	539	10,513	0,759	1,243
ІМ 40 ЕА*	959	602	1214	0,698	1,112	0,551
ІМ 40 АА*	52	22	11	12,955	30,892	62,750

Тут ІМ 40 ДЕ* – додаткова декларація до попередньої митної декларації заповнена у митному режимі імпорту; ІМ 40 ЕА* – попередня митна декларація з обсягом даних, необхідним для випуску товарів у митний режим імпорту; ІМ 40 АА* – митна декларація, заповнена у звичайному порядку в митному режимі імпорту.

Результати розрахунків доводять, що тривалість митного оформлення залежить від виду митної декларації, виду товарів та кваліфікації митного інспектора. На час декларування також впливає очікування у черзі, вид необхідного митного контролю та у випадку спрацювання СУР – митного огляду. Зміни середньої тривалості митного оформлення представимо на рис. 4.

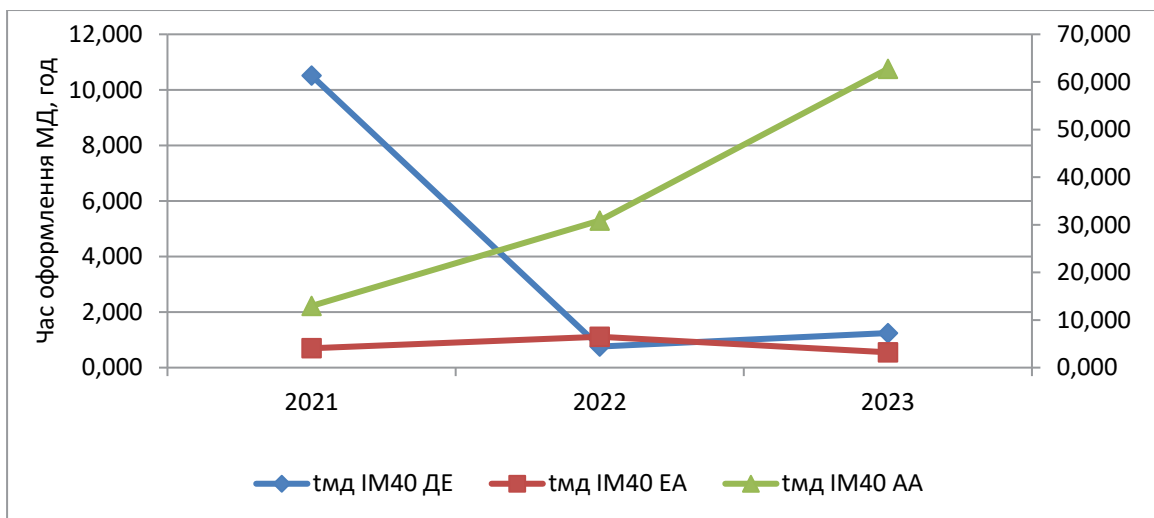


Рис. 2. Зміна тривалості митного оформлення з урахуванням ефективності роботи митних інспекторів

Як показав аналіз статистичних даних по митному посту, то митне оформлення із використанням СУР найбільш швидким є для підприємств великого розміру та підприємств, які є найбільшими платниками податків. У зв'язку із військовою агресією на митній території України та із збільшенням кількості у проведенні митних оглядів середній час на митне оформлення за митною декларацією типу ІМ 40 ДЕ у 2023 році зменшився на 88% у порівнянні до 2021 року; за митною декларацією типу ІМ 40 ЕА зменшився на 21%, а за митною декларацією типу ІМ 40 АА збільшився на 79%, що пов'язане з посиленням контролю за ризикованими імпорними операціями та виявленню незаконному переміщенню товарів у поштових відправленнях під час військових дій на митній території України.

За останні роки середовище міжнародної торгівлі зазнало значних змін. Перше, що вплинуло це Covid-19, закриття кордонів, і як наслідок військового вторгнення РФ на митну територію України. Тому, це особливо це стосується способів перевезення і торгівлі товарами, швидкості операцій та абсолютного об'єму товарів в глобальному обороті.

Профілювання ризиків – це засіб, за допомогою якого митні інспектори можуть застосовувати управління ризиками на практиці.

Зарубіжний досвід управління ризиками підтверджує необхідність автоматизації та удосконалення системи при електронному декларуванні, врахування регіональної специфіки митних органів при визначенні профілів ризику.

Для цього доцільно було б дозволити митним органам самостійно формувати профілі ризику, які були б застосовані безпосередньо на даному митному посту.

Таким чином пропонується ввести нову штатну одиницю. Найняти висококваліфікованих спеціалістів для роботи в підрозділах митних органів, що займалися б розробкою та впровадженням автоматизованої системи аналізу та управління ризиками. Вони повинні володіти на високому рівні спеціальними галузевими знаннями та мати навички з написання комп'ютерних програм, уміння розв'язувати нестандартні економічні задачі з використанням математичного апарату.

У зв'язку з цим потрібно порахувати необхідну кількість чоловік для роботи в даному профілі.

Враховуючи поставлені задачі можна сказати, що для даного підрозділу необхідно всього чотири висококваліфікованих працівники. Повинен бути начальник та троє підлеглих, кожен з яких виконуватиме певні задачі, що стосуються аналізу та розробки СУР.

Висновки. Одержані в даній роботі результати відіграють важливу роль при плануванні обсягів зовнішньої торгівлі товарами та аналізі надходжень митних платежів до Державного бюджету України на 2024 рік саме з митного поста регіональної митниці.

Як показав аналіз статистичних даних по м/п, то митне оформлення із використанням СУР найбільш швидким є для підприємств великого розміру та підприємств, які є найбільшими платниками податків. У зв'язку із військовою агресією на митній території України та із збільшенням кількості у проведенні митних оглядів середній час на митне оформлення за митною декларацією типу ІМ 40 ДЕ у 2023 році зменшився на 88% у порівнянні до 2021 року; за митною декларацією типу ІМ 40 ЕА зменшився на 21%, а за митною декларацією типу ІМ 40 АА збільшився на 79%, що пов'язане з посиленням контролю за ризикованими імпорними операціями та виявленню незаконному переміщенню товарів у поштових відправленнях під час військових дій на митній території України.

Список використаних джерел:

1. Митний кодекс України від 13.03.2012 № 4495-VI [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/4495-17>.
2. Про затвердження Порядку здійснення фото-, відео фіксації митних та інших формальностей, які проводяться контролюючими органами :ПКМУ від 08.06.2016 № 370 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/370-2016-%D0%BF#Text>.
3. Про затвердження Порядку виконання митних формальностей при здійсненні митного оформлення товарів із застосуванням митної декларації на бланку єдиного адміністративного документа : наказ Мінфіну від 30.05.2012 № 631 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z1360-12>.
4. Про затвердження Порядку здійснення аналізу та оцінки ризиків, розроблення і реалізації заходів з управління ризиками для визначення форм та обсягів митного контролю : наказ Мінфіну від 31.07.2015 № 684 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1021-15>.
5. Про затвердження відомчих класифікаторів інформації з питань державної митної справи, які використовуються у процесі оформлення митних декларацій : наказ Мінфіну від 20.09.2012 № 1011 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1011201-12#Text>.
6. World Customs Organization (2011). Risk Management Compendium: Common part. URL: www.kmu.gov.ua/dmsu/control/uk/publish.
7. Статистика та реєстри. Статистика декларування, переміщення товарів та транспортних засобів [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://customs.gov.ua/statistika-ta-reiestri>

-
8. Постанова про внесення змін до постанови Кабінету Міністрів України від 21 травня 2012 р. № 450 та визнання такою, що втратила чинність, постанови Кабінету Міністрів України від 5 серпня 2020 р. № 681 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1090-2022-%D0%BF#Text>
 9. Крисоватий А. І., Мельник В. М., Кошук Т. В. Сутність та концептуальні основи формування податкової політики в умовах євроінтеграційних процесів. Економіка України. 2016. № 1. С. 35–51.
 10. Гребельник О.П. Митна справа. Підручник. 5-те вид. оновл. та доповн./ О.П. Гребельник. К.: Центр учбової літератури, 2017. 400 с.
 11. Герчаківський С. Д., Сідляр В. В. Фіскальне регулювання зовнішньо економічної діяльності : навч. посіб. – Тернопіль : ТНЕУ, 2020. – 250 с.
 12. Баранов С. О. Митне право України : навчально-методичний посібник. Одеса, 2017. 375 с.
 13. Прокопенко В. В. Виконання митних формальностей при переміщенні товарів через митний кордон України різними видами транспорту : монографія. Дніпро : Ун-т митної справи та фінансів. 2018. 336 с.
 14. Найденко О.Є., Тихомирова Д.В. Роль митних платежів в митній політиці. Інфраструктура ринку. Випуск 60. Ст.180-185. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до статті: http://market-infr.od.ua/journals/2021/60_2021/34.pdf
 15. Дубовик О., Мартинюк І. Фіскальна ефективність митних платежів в Україні. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до статті: <http://dspace.oneu.edu.ua>
 16. Доходи держбюджету України. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://index.minfin.com.ua/ua/finance/budget/gov/income/> (дата звернення: 05.12.2022)
 17. Наконечний С.І. Економетрія: підручник / Наконечний С.І., Терещенко Т.О., Романюк Т.П. – К.: КНЕУ, 2004. 520 с.
 18. Майбородіна Н.В. Економетрика: навчальний посібник / Майбородіна Н.В. – Ніжин: ПП Лисенко М.М., 2021. 280 с.
 19. Жлуктенко В.І., Наконечний С.І., Савіна С.С. Теорія ймовірностей та математична статистика. – К.: КНЕУ, 2001. 336 с.
 20. Васильків І.М. Основи теорії ймовірностей і математичної статистики: навч. посібник. – Львів : ЛНУ імені Івана Франка, 2020. 184 с.
 21. Про затвердження Порядку роботи складу митниці ДМСУ : Наказ Мінфіну від 30 травня 2012 року № 627 / Верховна Рада України. База «Законодавство України». URL: <https://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z1097-12> (дата звернення: 16.07.2020).
 22. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року: розпорядження КМУ від 30 травня 2018 р. № 430 <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text>
 23. Геворкян Е. С. Основи кваліметрії: Конспект лекцій. – Харків: УкрДУЗТ, 2022. – 84 с.
 24. World Customs Organization (2021) (Customs Cooperation Council,) Texts of the Technical Committee on Customs Valuation, gives examples of various decisions and scenarios related to Customs Valuation.
 25. World Trade Organization (2011), The WTO and preferential trade agreements: From co-existence to coherence, WTO, Geneva
 26. WTO/UNCTAD (2016), Analyzing bilateral trade using the gravity equation, chapter 3 in A Practical Guide to Trade Policy Analysis, <https://vi.unctad.org/tpa/web/docs/vol1/ch3.pdf>, Geneva

References:

1. Mytnyi kodeks Ukrainy vid 13.03.2012 № 4495-VI (2012) [Customs Code of Ukraine dated March 13, 2012 No. 4495-VI] Elektronnyi resurs <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/4495-17> [in Ukrainian]
2. Pro zatverdzhennia Poriadku zdiisnennia foto-, video fiksatsii mytnykh ta inshykh formalnostei, yaki provodiatsia kontroliuichymy orhanamy: PKMU vid 08.06.2016 № 370 (2016). [On the approval of the Procedure for photo and video recording of customs and other formalities, which are carried out by controlling bodies: PCMU dated 06.08.2016 No. 370] Elektronnyi resurs <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/370-2016-%D0%BF#Text> [in Ukrainian]
3. Pro zatverdzhennia Poriadku vykonannia mytnykh formalnostei pry zdiisnenni mytnoho oformlennia tovariv iz zastosuvanniam mytnoi deklaratsii na blanku yedynoho administratyvnoho dokumenta : nakaz Minfinu vid № 631 (2012) [On the approval of the Procedure for the fulfillment of customs formalities during customs clearance of goods using a customs declaration on the form of a single administrative document: order of the Ministry of Finance of 05/30/2012 No. 631] Elektronnyi resurs <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z1360-12> [in Ukrainian]
4. Pro zatverdzhennia Poriadku zdiisnennia analizu ta otsinky ryzykiv, rozroblennia i realizatsii zakhodiv z upravlinnia ryzykamy dlia vyznachennia form ta obsiahiv mytnoho kontroliu : nakaz Minfinu vid 31.07.2015 № 684 (2015) [On the approval of the Procedure for carrying out risk analysis and assessment, development and implementation of risk management measures for determining the forms and scope of customs control: Order of the Ministry of Finance of July 31, 2015 No. 684] Elektronnyi resurs <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1021-15> [in Ukrainian]

-
5. Pro zatverdzhennia vidomchykh klasyfikatoriv informatsii z pytan derzhavnoi mytnoi spravy, yaki vykorystovuiutsia u protsesi oformlennia mytnykh deklaratsii : nakaz Minfinuvid (2012) [On the approval of departmental classifiers of information on state customs affairs, which are used in the process of issuing customs declarations: order of the Ministry of Finance and Information dated 20.09.2012 No. 1011] Elektronnyi resurs <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v1011201-12#Text> [in Ukrainian]
 6. World Customs Organization. Risk Management Compendium: Common part. (2011). [World Customs Organization (2011). Risk Management Compendium: Common part] URL: www.kmu.gov.ua/dmsu/control/uk/publish [in English]
 7. Statystyka ta reiestry. Statystyka deklaruvannia, peremishchenniatovariv ta transportnykh zasobiv [Statistics and registers. Statistics of declaration, movement of goods and vehicles] Elektronnyi resurs <https://customs.gov.ua/statistika-ta-reiestri> [in Ukrainian]
 8. Postanova pro vnesennia zmin do postanovy Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 21 travnia 2012 r. № 450 ta vyznannia takoiu, shchovtratylyachynnist, postanovy Kabinetu Ministriv Ukrainy vid 5 serpnia 2020 r. № 681 (2020) [Resolution on amendments to Resolution No. 450 of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated May 21, 2012 and recognition as invalid of Resolution No. 681 of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated August 5, 2020] [Elektronnyi resurs] <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1090-2022-%D0%BF#Text> [in Ukrainian]
 9. Krysovatyi A. I., Melnyk V. M. & Koshchuk T. V. (2016). Sutnist ta kontseptualni osnovy formuvannia podatkovoi polityky v umovakh ievrointehratsiinykh protsesiv [The essence and conceptual foundations of tax policy formation in the context of European integration processes] «Economy of Ukraine», (1), S. 35–51 [in Ukrainian]
 10. Hrebelnyk O.P. (Eds) (2017) Mytna sprava. (5-te vyd. onovl. ta dopovn./ O.P. Hrebelnyk) [Customs case. 5th species update and supplement]]. K.: Center for Education and Literature. [in Ukrainian]
 11. Herchakivskiy S. D. & Sidliar V. V. (2020) Fiskalne rehuliuвання zovnishno ekonomichnoi diialnosti [Fiscal regulation of external economic activity], study manual, Ternopil TNEU [in Ukrainian]
 12. Baranov S. O. (2020) Mytne pravo Ukrainy [Customs Law of Ukraine: educational and methodological manual], Odesa [in Ukrainian]
 13. Prokopenko V. V. (2018) Vykonannia mytnykh formalnostei pry peremishchenni tovariv cherez mytni kordon Ukrainy riznymi vydamy transport [Execution of customs formalities during the movement of goods across the customs border of Ukraine by various modes of transport: monograph], Dnipro: «University of Customs and Finance» [in Ukrainian]
 14. Naidenko O.I. & Tykhomyrova D.V. (2021) Rol mytnykh platezhiv v mytnii politytsi. Infrastruktura rynku [The role of customs payments in customs policy. Market infrastructure] «Electronic resource», 60, S. 180-185 http://market-infr.od.ua/journals/2021/60_2021/34.pdf [in Ukrainian]
 15. Dubovyk O. & Martyniuk I. Fiskalna efektyvnist mytnykh platezhiv v Ukraini [Fiscal efficiency of customs payments in Ukraine] «Electronic resource» <http://dspace.oneu.edu.ua> [in Ukrainian]
 16. Dokhody derzhbiudzhetu Ukrainy(2022) [Revenues of the state budget of Ukraine] «Electronic resource» (date of application: 05.12.2022) <https://index.minfin.com.ua/ua/finance/budget/gov/income/> [in Ukrainian]
 17. Nakonechnyi S.I., Tereshchenko T.O. & Romanyuk T.P. (2004). Ekonometriia: pidruchnyk [Econometrics: a textbook] «K.: KNEU» [in Ukrainian]
 18. Maiborodina N.V. (2021) Ekonometryka [Econometrics: a study guide] «Nizhyn: PP Lysenko M.M.» [in Ukrainian]
 19. Zhluktenko V.I., Nakonechnyi S.I. & Savina S.S. (2001) eoriia ymovirnostei ta matematychna statystyka [Probability theory and mathematical statistics] «K.: KNEU» [in Ukrainian]
 20. Vasylyk I.M. (2020) Osnovy teorii ymovirnostei i matematychnoi statystyky: navch. posibnyk [Basics of probability theory and mathematical statistics: teaching. manual] Lviv : «LNU imeni Ivana Franka» [in Ukrainian]
 21. Pro zatverdzhennia Poriadku roboty skladu mytnytsi DMSU : Nakaz Minfinu vid 30 travnia 2012 roku № 627/ Verkhovna Rada Ukrainy. Baza «Zakonodavstvo Ukrainy» (2012) [On the approval of the Procedures for the composition of the Customs Service of the State of Ukraine: Order of the Ministry of Finance of May 30, 2012 No. 627 / Verkhovna Rada of Ukraine. Database “Legislation of Ukraine”] URL: https://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z1097-12_16.07.2020 [in Ukrainian]
 22. Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku: rozporiadzhennia KMU vid 30 travnia 2018 r. № 430 (2018) [On the approval of the National Transport Strategy of Ukraine for the period until 2030: Order of the CMU of May 30, 2018 No. 430] <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-%D1%80#Text> [in Ukrainian]
 23. Hevorkian E. S. (2022). Osnovy kvalimetrii: Konspekt lekttsii [Fundamentals of qualimetry: Lecture notes], Kharkiv: «UkrDUZT» [in Ukrainian]
 24. World Customs Organization (2021) (Customs Cooperation Council,) Texts of the Technical Committee on Customs Valuation, gives examples of various decisions and scenarios related to Customs Valuation [in English]
 25. World Trade Organization (2011), The WTO and preferential trade agreements: From co-existence to coherence, WTO, Geneva [in English]
 26. WTO/UNCTAD (2016), Analyzing bilateral trade using the gravity equation, chapter 3 in A Practical Guide to Trade Policy Analysis, <https://vi.unctad.org/tpa/web/docs/vol1/ch3.pdf>, Geneva 5 [in English]
-

UDC 656.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.15>

Nesterenko H. I., Candidate of Technical Sciences,
Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Service
and Logistics
Ukrainian State University of Science and Technologies
ORCID: 0000-0003-1629-0201

Muzykin M. I., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies
and International Logistics
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0003-2938-7061

Bibik S. I., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Transport Technologies
and Management of Transportation Processes
State University of Infrastructure and Technologies
ORCID: 0000-0002-5832-6949

Strelko O. H., Doctor of Historical Sciences, Professor,
Dean of the Faculty of Railway Transport Management
State University of Infrastructure and Technologies
ORCID: 0000-0003-3173-3373

Aleksieieva A. O., Traffic Dispatch Operator of Loading
and Unloading Works
“Eurobud Plus” LLC
ORCID: 0009-0002-5037-0352

ANALYSIS OF ORGANIZING THE DELIVERY OF HUMANITARIAN AID IN CRISIS SITUATIONS

The article is devoted to analyzing humanitarian logistics in Ukraine, which has developed significantly since 2014 and increased, in particular, during the full-scale invasion of 2022. Humanitarian logistics have become critical to supporting both the military and civilians affected by the conflict. The authors research the impact of various aspects of humanitarian aid, including economic factors such as reduced exports and a drop in the gross domestic product (GDP), on the volume and efficiency of humanitarian aid delivery. In particular, the impact of the closure of large metallurgical enterprises on the country's economy is analyzed. The activities of such charitable organizations as “Come Back Alive” and “Volunteering and Help Center” were reviewed, which carry out mass transportation of humanitarian goods and provide support to both military and civilian persons. These organizations play a key role in providing the population with necessary resources, such as medicine, food, hygiene products, clothing, etc. They also actively collaborate with international partners and volunteer groups to coordinate aid and improve logistics processes. Data on the amount of support provided by category (hygiene, medicine, food, etc.) are also considered. The article provides an analysis of the logistics routes used for the delivery of goods, taking into account various factors such as the safety of the routes, the efficiency of the transportation process, and the speed of delivery. The importance of flexibility and adaptability of logistics systems in the conditions of continued martial law is highlighted. The research emphasizes the importance of cluster analysis and clustering methodologies for effective decision-making in the field of humanitarian logistics. The article also includes references to legislative acts and portals that regulate and support humanitarian aid in Ukraine. These resources provide a legal basis for the activities of charities and provide important information for donors and volunteers. They contribute to the transparency and accountability of the aid delivery process, which is critical for maintaining trust on the part of the international community and the population of Ukraine.

Key words: humanitarian logistics, cluster analysis, logistics routes, humanitarian goods.

© H. I. Nesterenko, M. I. Muzykin, S. I. Bibik, O. H. Strelko, A. O. Aleksieieva, 2024

Нестеренко Г. І., Музикін М. І., Бібік С. І., Стрелко О. Г., Алексєєва А. О. Аналіз організації доставки гуманітарної допомоги в кризових ситуаціях

Статтю присвячено аналізу гуманітарної логістики України, яка значно розвинулася з 2014 року та зростає, зокрема, під час повномасштабного вторгнення 2022 року. Гуманітарна логістика стала критично важливою для підтримки як військових, так і цивільних осіб, які постраждали від конфлікту. Досліджується вплив різних аспектів гуманітарної допомоги, зокрема економічних факторів, таких як скорочення експорту і падіння ВВП, на обсяг і ефективність доставки гуманітарних вантажів. Зокрема, аналізується вплив закриття великих металургійних підприємств на економіку країни. Було розглянуто діяльність таких благодійних організацій, як «Повернись живим» та «Центр волонтерства та захисту», які здійснюють масові перевезення гуманітарних вантажів, які надають підтримку як військовим, так і цивільним особам. Ці організації відіграють ключову роль у забезпеченні населення необхідними ресурсами, такими як медикаменти, харчові продукти, гігієнічні засоби, одяг та інші. Вони активно співпрацюють з міжнародними партнерами та волонтерськими групами для координації допомоги та покращення логістичних процесів. Також розглядається дані про обсяг підтримки, що надається за категоріями (гігієна, медикаменти, продукти харчування і т.д.). В статті надається аналіз логістичних маршрутів, що використовуються для доставки вантажів з урахуванням таких факторів, як безпека маршрутів, ефективність транспортування та швидкість доставки. Висвітлюється важливість гнучкості та адаптивності логістичних систем у відповідь на змінні умови конфлікту та потреби населення. Дослідження підкреслює важливість кластерного аналізу та методологій кластеризації для ефективного прийняття рішень у галузі гуманітарної логістики. Також в статті містяться посилання на законодавчі акти та портали, які регулюють і підтримують гуманітарну допомогу в Україні. Ці ресурси забезпечують правову основу для діяльності благодійних організацій, а також містять важливу інформацію для донорів та волонтерів. Вони сприяють прозорості та підвітності процесу надання допомоги, що є критично важливим для підтримки довіри з боку міжнародної спільноти та населення України.

Ключові слова: гуманітарна логістика, кластерний аналіз, логістичні маршрути, гуманітарні вантажі.

Formulation of the problem. Natural disasters, the COVID-19 pandemic, and the full-scale military invasion of the Russian Federation, all these phenomena are catalysts and factors in the development of the transport and logistics system for the transportation of humanitarian goods in special conditions. This article is particularly topical even today during the full-scale invasion of Russia on the territory of Ukraine. The experts noted that “the scale of humanitarian aid in Ukraine remains enormous.” Therefore, this article is relevant.

Analysis of recent research and publications.

There are the following factors that have influenced changes in logistics services in Ukraine: a mass movement of the population abroad, the unstable psychological state of the population, mobilization of the male population, the appearance of “new” types of goods (humanitarian aid and military supplies); mass internal motion of enterprises. Also, there are problems related to the transport infrastructure damage, due to which established logistics chains were destroyed [1, p. 161]. But, regardless of all these obstacles, companies carrying out the transportation of humanitarian goods use the following principle – in a heavy lorry, the freight that does not take up all the space in the freight compartment, it becomes possible to fill this space with additional freight. In this way, the fuel shortage is compensated and savings are achieved in the time during which the freight must arrive at the final destination.

As for the delivery of humanitarian goods in international traffic, these features are disclosed in the article [2]. In this article, the authors considered the main problems that may arise during the organization of international transportation and found that to increase the efficiency of this process, it is sufficient to define a rational scheme for the delivery of goods.

In turn, the article [3] presents examples usage of intelligent route modeling for the transportation of humanitarian goods. Also, it provides the scheme of the transport network of delivery, which is used to determine the basic plan of transportation. Also, we can see the scheme of operational management of cargo delivery when applying the concept of situational route selection (Fig. 1), which may arise during an “unpredictable situation” on a pre-planned route.

When an unpredictable situation occurs, it is necessary not only to determine the situation itself and several relevant management decisions but also to determine a reasonable way to achieve the goals in planning and operational management for the choice of delivery routes. For this, one needs to consider the possible consequences of several steps preceding the adoption of management decisions.

The genetic algorithm as an approach for global optimization is presented in the article [4]. The following advantages are given as an argument, such as:

1. Learning optimization: genetic algorithms can solve complex optimization problems of transportation systems by finding the best solution among different alternatives.
2. Ability to consider many factors: genetic algorithms can consider many parameters and restrictions of the transportation system, such as cost, travel time, and safety.
3. Adaptability to changes: genetic algorithms can adapt to changes, such as changes in traffic volumes, resource restrictions or changes in demand for transport services.
4. Ability to optimize complex functions: genetic algorithms can be used to optimize complex functions that are nonlinear, continuous, or contain multiple local optimum.

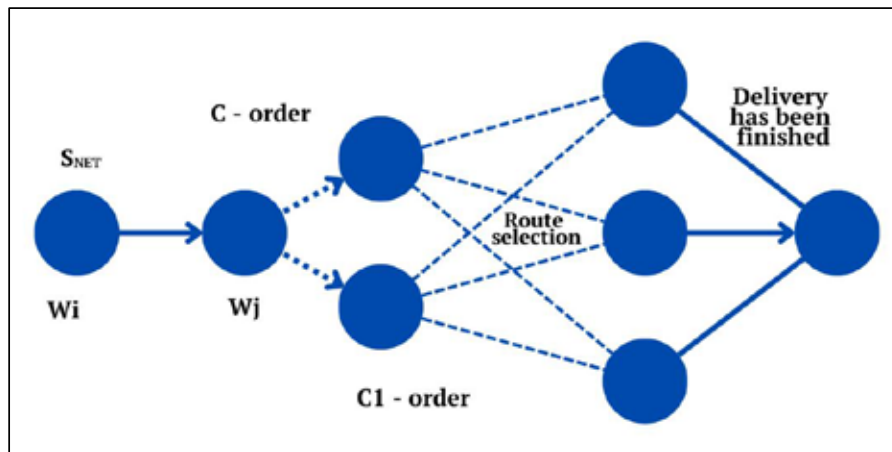


Figure 1. Operational management of freight delivery when applying the concept of situational route selection [3]

In the article [5] the authors emphasize the efficiency of integration processes when the Ukrainian transport system enters the European transport network. They note that this factor is an important one affecting the development of the country's economy.

In [6] it is underlined that within the framework of the transport market it is possible to separate two main interacting subjects: the transport system and consumers of transport products – consignors and consignees.

In paper [7] the results showed that the use of cluster analysis facilitates decision-making at the stage of intervention in humanitarian logistics. The authors propose a clustering methodology that works on processing historical data on natural disasters, creating models and clusters of the most characteristic types of emergencies in the region. As a result, communities can improve the standardization of disaster prevention procedures.

The purpose of the article is to analyze statistical data on the volume of humanitarian goods on the territory of Ukraine, to identify ways to improve the main stages in the transportation process and to study the phenomenon of humanitarian logistics itself.

Presenting main material. In Ukraine, we heard firstly about humanitarian logistics in 2014, and this type of logistics received its second wave and flourished in 2022, during a full-scale invasion. [8, 9] These historical events have greatly influenced our lives, so let us consider several aspects and areas in which we can see changes.

Many experts estimate that the GDP of Ukraine will decrease by 112 billion US dollars in 2022. This is due to a significant reduction in exports. [10] The main reason for the drop-in exports is the closure of the metallurgical plants PJSC “Ilyich Iron And Steel Works of Mariupol”, PJSC «Azovstal Iron & Steel Works», PJSC “Zaporozhstal”, partly “ArcelorMittal Kryvyi Rih” and some other enterprises. Available data attests to the scale of problems in the country's economy. [11]. In October, the export of ore abroad reached 1.1 million tons, which is the lowest monthly figure until 2022. In December 2021, ore exports reached the lowest figure this year, amounting to 3.7 million tons worth US\$270 million, while the highest figure in dollar equivalent for December was 4.3 million tons worth US\$788.4 million in the fifth month of 2021. [10]

From the beginning of the full-scale war against Ukraine, all infrastructure and its spheres have been damaged or destroyed. Based on the data collected by the Kyiv School of Economics (KSE) [10], we can understand that the direct damage caused to the infrastructure of Ukraine amounts to 157 billion dollars. Figure 2 presents the dynamics of the overall assessment of direct costs in Ukraine's economy, \$ billion [11].

The largest part of the total amount of direct damage falls on housing 37.5% (\$58.9 billion) and infrastructure – 23.4% (\$36.8 billion). It is also noted that the total number of destroyed residential buildings is 250,000 units. Figure 3 shows the overall estimate of direct damage to infrastructure in the first quarter of 2024.

Transport infrastructure facilities such as roads, railways, airports and ports are vital for the organization of military communications and transport, as well as for the evacuation of the population. [12] This infrastructure is also important for the country's economy. As of April 2024, according to preliminary estimates, 19 airports, 110 railway stations, 344 bridges, and 25,400 km of roads were destroyed. This aspect both complicates the work of transport enterprises and is also critical for the logistics sector of Ukraine, that is, there is no possibility of returning the work of transport enterprises to pre-war conditions [13]. As you know, before the start of the full-scale invasion, there were four main sectors of the transport market in Ukraine, namely: aviation, sea, railway, and automobile [14]. After the start of hostilities, most seaports and airspace had to suspend their activities due to the introduction of martial law. Analytical data on trends in the freight transport market in 2022 [11] show that the war led to a 22% drop in road transport, 48% in rail transport, 85% in sea transport, and almost 100% in air transport. The drop in freight transportation by each market segment is shown in Figure 4.

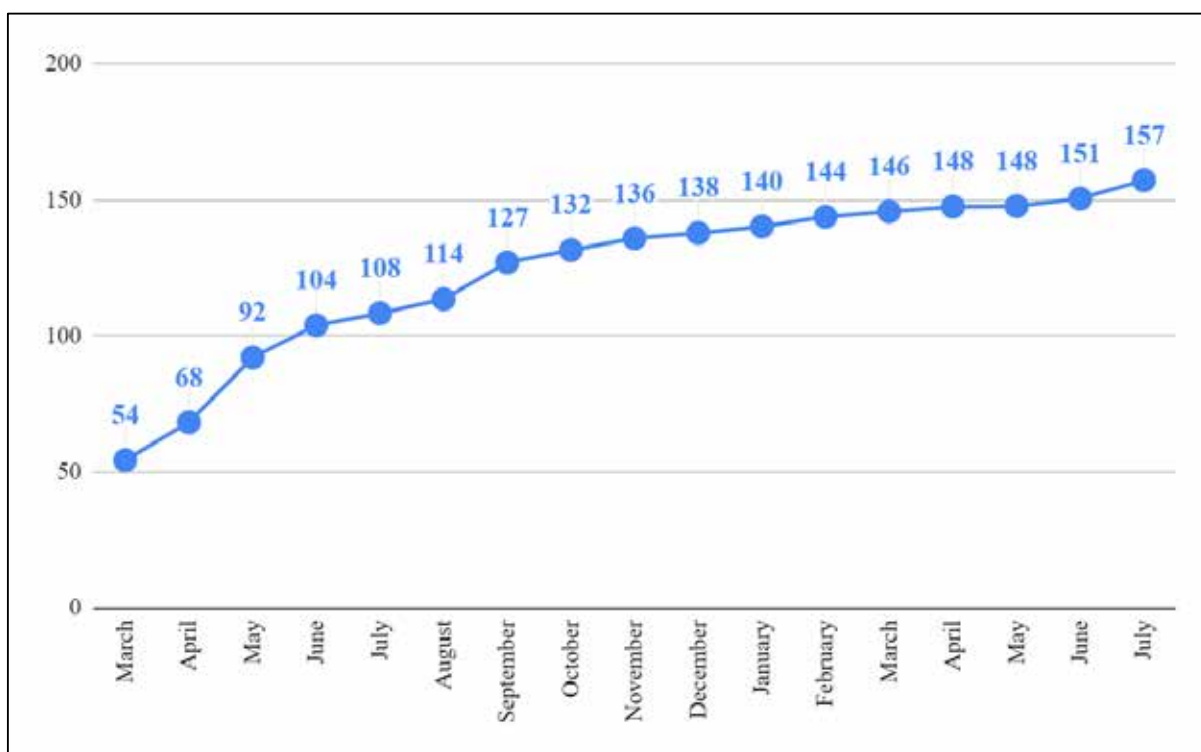


Figure 2. Dynamics of the overall assessment of direct costs in Ukraine's economy, \$ billion

Source: built according to the data [10]

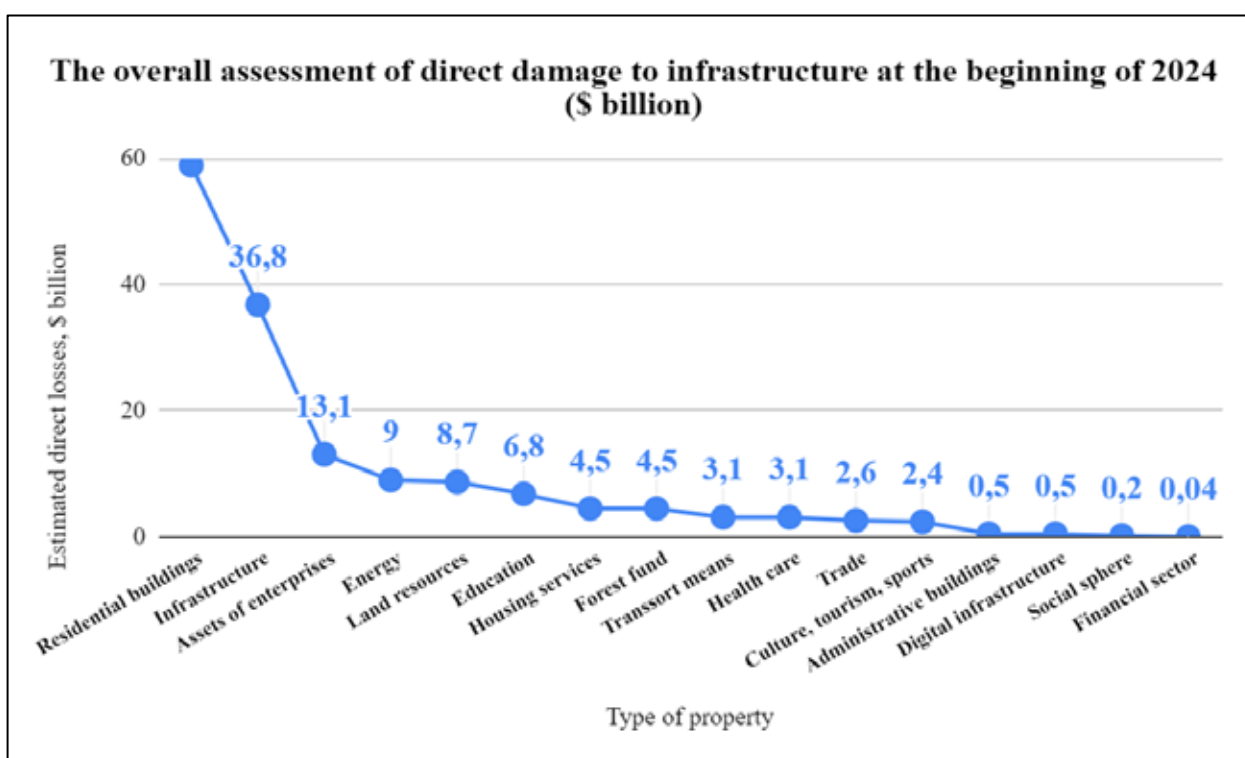


Figure 3. Assessment of direct damage to infrastructure in the first quarter of 2024 (it is compiled according to [10])

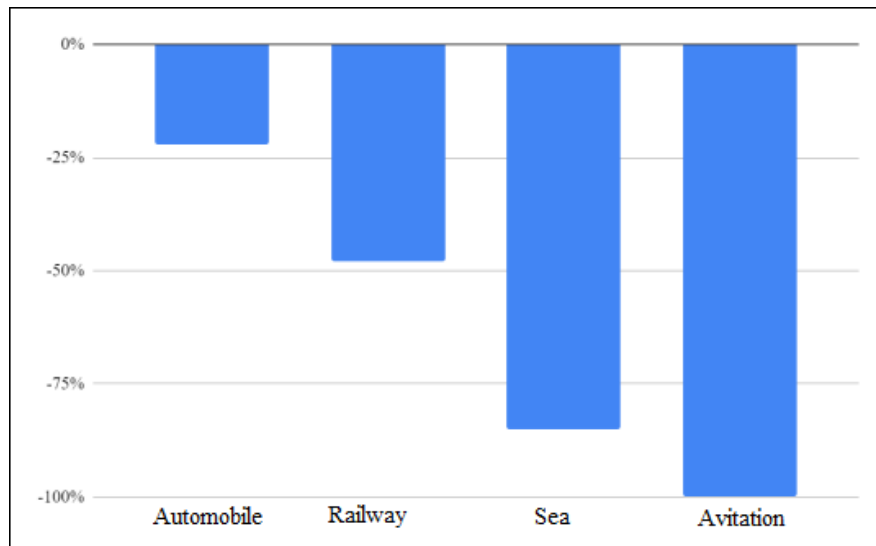


Figure 4. Decrease in freight traffic in Ukraine after the start of a full-scale Russian invasion (%)

Source: built according to the data [11]

Therefore, based on Figure 4, it is possible to understand why choosing freight transportation exactly by motor vehicles is optimal. However, it should not be forgotten that at the beginning of a full-scale invasion, the acute shortage of cars, drivers, and fuel was critical [15]. This was because the drivers left the territory of Ukraine to save their lives and those of their loved ones [16, 17]. All these factors impacted the migration of the population to the affected/temporarily occupied territories within the country. More than 14 million Ukrainians were left without their native homes and needed help.

Based on Art. 1 of the Law of Ukraine “On Humanitarian Aid” No. 1192 dated 10/22/1999: “humanitarian aid is designed-purpose addressed free aid in money or in kind as nonrepayable financial aid or voluntary donations, or aid in the form of fulfilling work or services provided by foreign and compatriot donors out of humane motives to recipients of humanitarian aid in Ukraine or abroad who need it due to social insecurity, poverty, difficult financial situation, state of emergency.” [18, 19]. The main needs demanded by Ukrainian society are medicines; fuel; sanitary and hygienic means; food; technical means and others.

The activities of foreign donors (about 40 of them) who provide military, humanitarian, and financial aid to Ukraine [20] are shown in Figure 5.

Having analyzed the Table, one can see that Poland and the Baltic countries are the leaders in helping Ukraine as a percentage of the country’s GDP. Estonia spent 1.26% of its GDP on aid, Latvia – 1.09%, Lithuania – 0.95%, and Poland – 0.68%. Slovakia and Denmark spend more than 0.5% of GDP to support Ukraine. Since the beginning of the full-scale war, the United States has provided Ukraine with the largest amount of aid – 76.84 billion US dollars. However, this is only 0.33% of US gross domestic product. The second place is occupied by Germany with 19.58 billion US dollars of aid. This is 0.27% of the country’s GDP. The United Kingdom ranks third, having provided \$11.67 billion, or 0.37% of GDP, in bilateral aid. Also, the aid was provided by France – 8.11 billion US dollars; Italy – 6.28 billion US dollars; The Netherlands – 7.24 billion US dollars; Spain – 5.21 billion US dollars.

Voluntary and charitable foundations perform active work as domestic donors. Before and during the full-scale invasion, dozens of volunteer funds and platforms were created, which are aimed at collecting and implementing humanitarian goods/aid for various segments of the population. In modern conditions, the issue of volunteering is becoming increasingly important and influential in society. Volunteers have become one of the most influential organizations in modern Ukraine. The level of trust of Ukrainians in the volunteer movement can be compared with the level of trust in the Armed Forces of Ukraine (AFU), which already says a lot about the influence and reputation in society [21]. Since the beginning of the full-scale invasion, dozens of charitable foundations (CF) and organizations have been established in our country. “Come Back Alive” is one of the largest funds supporting the Armed Forces of Ukraine, founded in 2014, and has a high reputation. The day before the invasion on February 23, 48 million hryvnias were collected. Since then, the scale of support has only grown, and at the end of July “Come Back Alive” reported 4 billion hryvnias in donations from 866,000 donors.

We can also consider the activities of the charitable organization (CO) “Volunteering and Help Center” (VHC) [22, 23]. Since the CF “Come Back Alive” is aimed at helping the army, the CO “VHC” directs its forces to support the civilian population of Ukraine. Having one main logistics center in Lviv and four regional ones in Zaporizhzhia, Kharkiv, Zhovti Vody, and Kherson, the fund carries out logistical transportation of humanitarian goods. The logistics route of the charitable organization is shown in Figure 6.

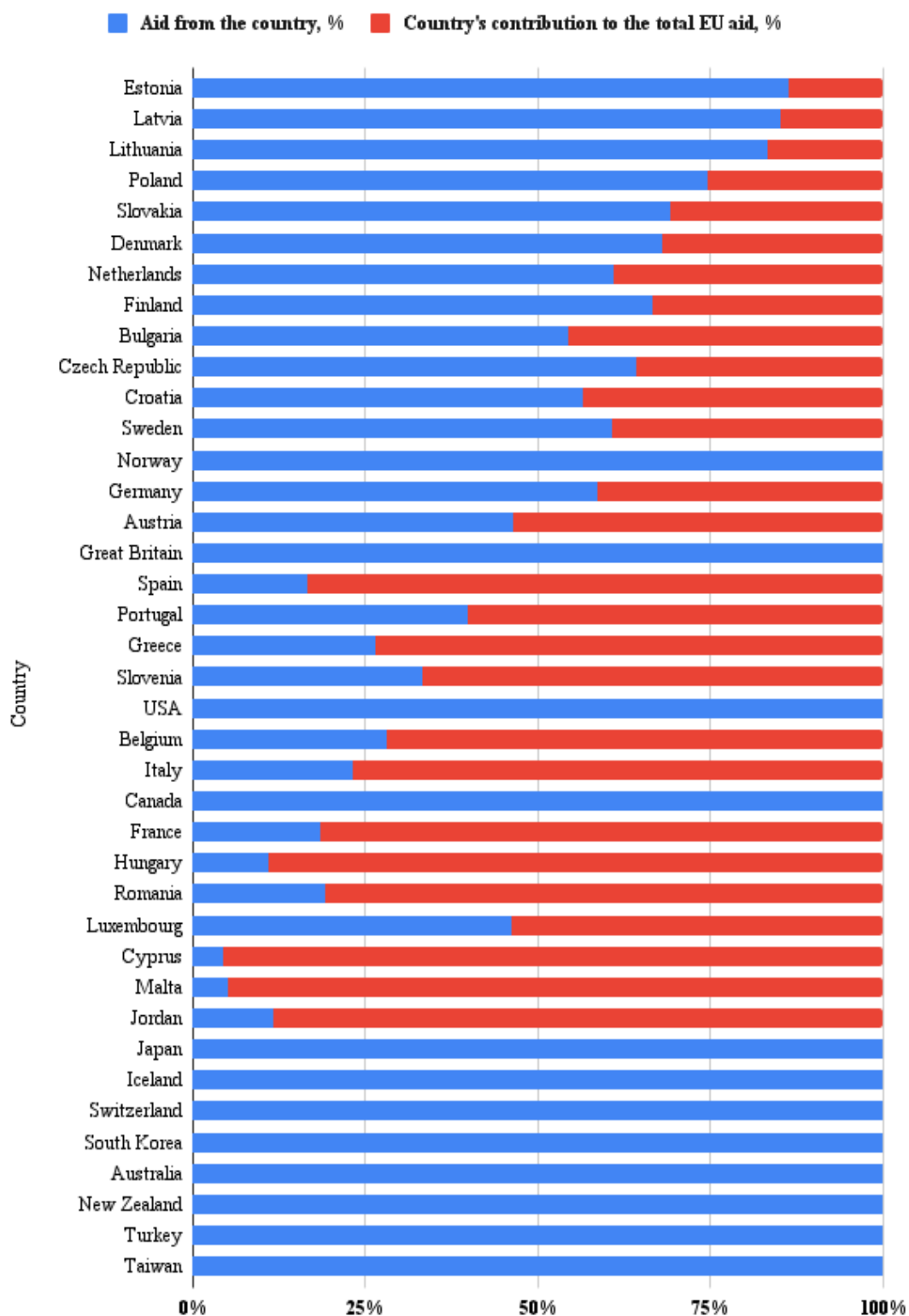


Figure 5. Analytics of the investment of monetary assistance from different countries in the world in % of GDP
 Source: compiled according to the data [20]

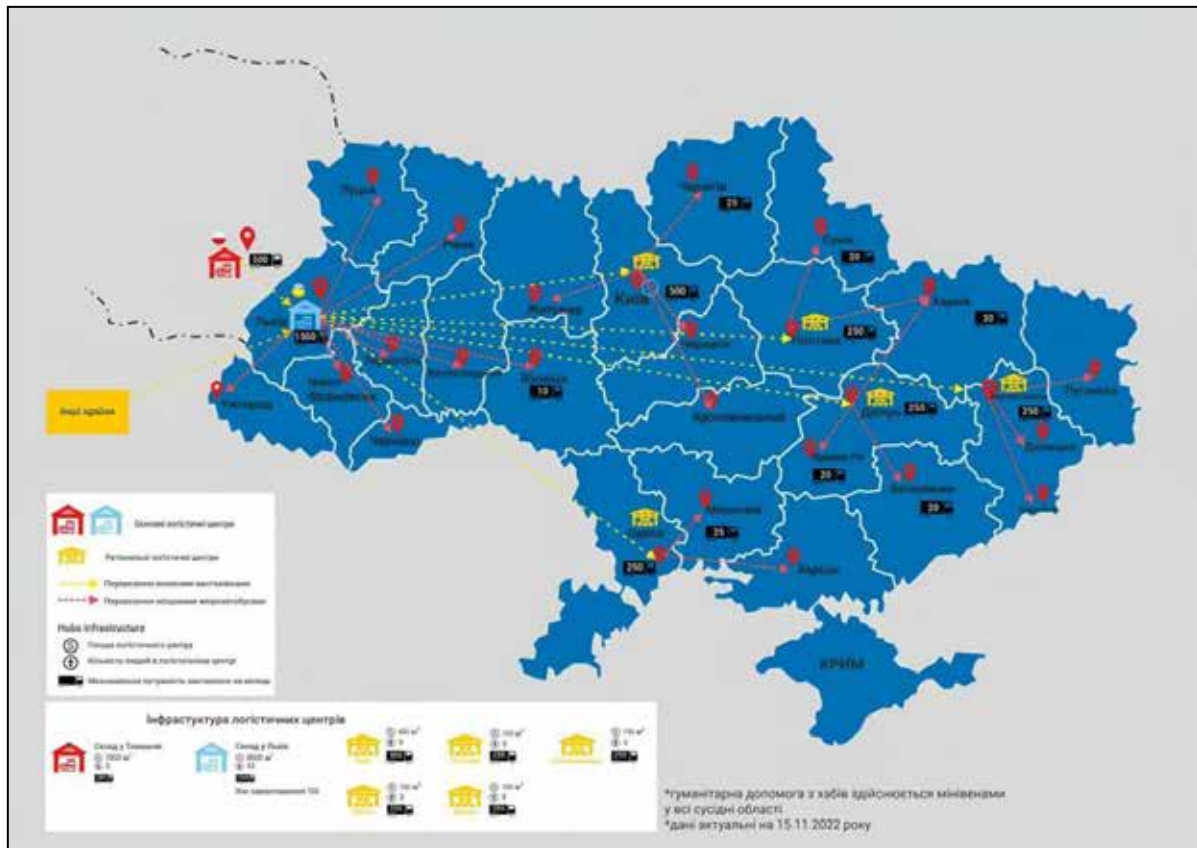


Figure 6. Scheme of logistics chains of CO “VHC” [23]

Quantity of civilian aid shipments in 2022: hygiene – \$33,173 million; household goods – \$1,062 million; other – \$308 million; medicines – \$22,699 million; equipment – \$910 million; food products – \$20,391 million; munition – \$5,037 million; civilian clothing – \$11,487 million.

Table 1 shows the total amount of aid provided in 2023, pallets/cars.

Table 1

The total amount of aid provided in 2023, pallets/cars. It is compiled according to the data [23]

Category	Number of pallets	Number of vehicles
Hygiene	687	20
Household goods	201	6
Other	1329	39
Medicines	2411	71
Equipment	545	16
Food products	3217	95
Equipment	595	18
Civilian clothes	1476	43
Total:	10461	308

You can see a significant decrease in the number of cars and flights in 2023. To be more precise, the number of pallets in 2023 compared to 2022 decreased by 33,340 units, and the number of cars by 1,061 units. This decline can be attributed to a variety of factors, including economic conditions and changes in domestic and international aid policies.

Conclusions. An important aspect of organizing and effective systems for transporting humanitarian aid in special conditions is the ability to coordinate the activities of charitable organizations and volunteer groups through continuous monitoring and analysis of their activities. Also, one should not forget about the impact of economic factors (the closure of large industrial enterprises and a decline in GDP), which have significantly affected the possibilities of providing humanitarian aid.

The article considered the main aspects of humanitarian logistics in Ukraine, which have been developing since 2014 and significantly intensified during the martial law, which was implemented in 2022. The authors analyzed various factors affecting the volume and effectiveness of humanitarian aid supplies, including economic ones. In particular, the closure of large metallurgical enterprises, which had a significant impact on the country's economy, is being discussed.

The role of charitable organizations such as “Come back Alive” and “Volunteering and Help Center” in providing large-scale transportation of humanitarian goods and supporting both military personnel and the civilian population is highly appreciated. These organizations actively cooperate with international partners to improve logistics processes and aid coordination. Data on the amount of aid provided by category, including medicine, food and hygiene products, were also analysed.

The article highlights the importance of flexibility and adaptability of logistics systems, which must respond to changing conflict situations and the needs of the population. The article also emphasizes the need to use cluster analysis and other methods for effective decision-making in humanitarian logistics.

In this research we also analyzed the activities of foreign donors who provide humanitarian and financial aid to Ukraine. Poland and the Baltic States are the largest donors in terms of the share of GDP spent on aid to Ukraine, while the United States provides the largest financial assistance.

It is important to note that volunteer organizations play a decisive role in meeting the humanitarian needs of the Ukrainian population. The research analyzed in detail the volumes and types of assistance provided by various organizations, and also emphasized the importance of coordinated logistics processes and effective organization.

Overall, the article demonstrates the importance of an integrated approach to organizing humanitarian aid in crisis situations and emphasizes the need for continuous monitoring and analysis to optimize logistics processes.

Bibliography:

1. Гринів, Н. Т., & Равліковська, А. А. (2022). Перебудова логістики в умовах воєнного стану в Україні. *Академічні візії*, (13). вилучено із <https://www.academy-vision.org/index.php/av/article/view/84> (дата звернення: 14.05.2024)

2. М. Мікуліна, О. Клещ, А. Метенко, А. Черниш. (2023). Гуманітарна логістика України в умовах бойових дій. Toronto : Perfect Publishing, 2023. P. 204-209.

3. Помазков М. В., Мнацаканян М. С., Маник І. С. Моделювання інтелектуальних маршрутів перевезення гуманітарних вантажів в умовах воєнного часу. *Подільський вісник: сільське господарство, техника, економіка*. № 41. 2023. С. 46–53.

4. Музикін М. І., Нестеренко Г. І., Щербина Р. С., Алтухова А. С. Порівняння сучасних методів оптимізації функціонування транспортних систем. *Інтелектуальні транспортні технології : тези доповідей IV міжнар. наук.-техн. конф.* Харків : УкрДУЗТ, 2023. С. 96-98.

5. Nesterenko, H. I., Muzykin, M. I., Strelko, O. H., Bibik, S. I., & Aleksieieva, A. O. (2023). ANALYSIS OF POSSIBILITIES FOR INTEGRATING THE TRANSPORT SYSTEM OF UKRAINE INTO THE EUROPEAN TRANSPORT NETWORK. *Systems and Technologies*, 66(2), 97-107. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.11>.

6. Бех П. В., Нестеренко Г. І., Стрелко О. Г., Музикін М. І. Управління вантажними перевезеннями в умовах ризиків конкурентного середовища. *Системи та технології*. № 1(61). 2021. С. 85-97.

7. Зарицький, О. В., & Костенко, О. Б. Ранжування просторово-розподілених систем для моніторингу ресурсів при надзвичайних ситуаціях. *Проблеми надзвичайних ситуацій*. 2020. № 2(32). С. 117-131.

8. LUCHNYKOVA, T. (2022). Міжнародні вантажні перевезення територією України в умовах війни. *INTERNATIONAL SCIENTIFIC-PRACTICAL JOURNAL» COMMODITIES AND MARKETS*, 43(3), 37-46

9. Гнедіна, К. В., & Нагорний, П. В. (2023). РИНОК ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ В УКРАЇНІ: АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ, ВИКЛИКИ ВОЄННОГО ЧАСУ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ. *Підприємство і торгівля*, (38), 19-28.

10. Загальна сума збитків, завдана інфраструктурі України, зросла до майже \$155 млрд – оцінка KSE Institute станом на січень 2024 року. *Kyiv School of Economics*. URL: <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zagalna-suma-zbitkiv-zavdana-infrastrukturii-ukrayini-zroslo-do-mayzhe-155-mlrd-otsinka-kse-institute-stanom-na-sichen-2024-roku/> (дата звернення: 26.04.2024).

11. Звіт про прямі збитки інфраструктури від руйнувань внаслідок військової агресії Росії проти України станом на початок 2024 року. Київ : KSE Institute, 2024. 39 с.

12. Музикін М. І., Лисогоря М. С., Струсевич Ю. В., Нечаєв М. С. Сучасні шляхи забезпечення стійкості роботи об'єктів транспортної інфраструктури в умовах воєнного стану. *Інтелектуальні транспортні технології : тези доповідей IV міжнар. наук.-техн. конф.* Харків : УкрДУЗТ, 2023. С. 363.

13. Війна в Україні: економіка, бізнес, логістика, допомога. URL: <https://trans.info/ru/viyna-v-ukrayini-ekonomika-biznes-logistika-dopomoga-279148> (дата звернення: 14.05.2024)

14. Ринок вантажних перевезень у 2022 році. TradeMasterGroup. URL: <https://trademaster.ua/articles/313620> (дата звернення: 30.04.2024)

15. Збірник тез доповідей XVIII Міжнародної наукової конференції «Раціональне використання енергії в техніці. TechEnergy 2022» (17-19 травня 2022 року). Національний університет біоресурсів і природокористування України. Київ, 2022. 234 с.

16. Іванушко А. Є., Калініченко О. П. Удосконалення перевезень вантажів в міжнародному сполученні. Збірник тез доповідей XII Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та аспірантів «Підвищення надійності машин і обладнання». Кропивницький: КНТУ, 2018. С. 152-155.

17. Логістика і транспортна безпека: проблеми та перспективи розвитку в контексті аналізу сучасних викликів, загроз; збірник наукових праць за матеріалами Всеукраїнської наукової конференції. Дніпро: Укр. держ. ун-ту науки і технологій, 2022. 192 с.

18. Про гуманітарну допомогу : Закон України від 22.10.1999 р. № 1192-XIV : станом на 23 січ. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1192-14#Text> (дата звернення: 23.04.2024).

19. Портал гуманітарної допомоги. URL: <https://help.gov.ua/> (дата звернення: 23.04.2024).

20. Які країни-союзники роблять найбільший внесок у перемогу України. *Слово і Діло*. URL: <https://www.slovoidilo.ua/2023/07/17/infografika/ekonomika/yaki-krayiny-soyuznyku-roblyat-najbilshyj-vnesok-peremohu-ukrayinu> (дата звернення: 29.04.2024).

21. Липитчук, О. (2022). ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ ВОЛОНТЕРСЬКОГО РУХУ В УКРАЇНІ. *Scientific Collection «InterConf»*, (118), 180–188. Retrieved from <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/1030> (дата звернення: 14.05.2024).

22. Редакція. Топ-7 благодійних організацій України. *Інформаційне агентство Вголос/Vgolos*. URL: https://vgolos.ua/news/top-7-blagodiynih-organizaciy-ukrayini_1428137.html (дата звернення: 14.05.2024).

23. Благодійна організація «Центр волонтерства та захисту». *ЦВЗ Центр Волонтерства та Захисту*. URL: <https://vdc.in.ua/> (дата звернення: 24.04.2024)

References:

1. Hryniv, N. T., & Ravlikovska, A. A. (2022). Reconstruction of logistics in the conditions of martial state in Ukraine. *Academic Visions*, (13). Retrieved from <https://www.academy-vision.org/index.php/av/article/view/84> (Accessed May 14, 2024).

2. Mikulina, M., Kleshch, O., Metenko, A., & Chernysh, A. (2023). Humanitarian logistics of Ukraine under military conditions. Toronto: Perfect Publishing. pp. 204-209.

3. Pomazkov, M. V., Mnatsakanyan, M. S., & Manyk, I. C. (2023). Modeling of intelligent routes of humanitarian cargo. Transportation in wartime conditions. *Podilskyi Bulletin: Agriculture, Engineering, Economics*, (41), 46-53.

4. Muzykin, M. I., Nesterenko, H. I., Shcherbyna, R. S., & Altukhova, A. S. (2023). Comparison of modern methods of optimizing the functioning of transport systems. *Intelligent Transport Technologies: Proceedings of the IV International Scientific-Technical Conference*. Kharkiv: UkrDUZT, pp. 96–98.

5. Nesterenko, H. I., Muzykin, M. I., Strelko, O. H., Bibik, S. I., & Aleksieieva, A. O. (2023). Analysis of possibilities for integrating the transport system of Ukraine into the European transport network. *Systems and Technologies*, 66(2), 97–107. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.11>

6. Bekh, P. V., Nesterenko, H. I., Strelko, O. H., & Muzykin, M. I. (2021). Cargo transportation management under competitive environment risks. *Systems and Technologies*, 1(61), 85–97.

7. Zarytskyi, O. V., & Kostenko, O. B. (2024). Ranking spatially distributed systems for resource monitoring in the emergency situations. *Problems of Emergency Situations*, 2(32), 117–131.

8. Luchnykova, T. (2022). International freight transportation across Ukraine during the war. *International Scientific-Practical Journal «Commodities and Markets»*, 43(3), 37-46.

9. Hnedina, K. V., & Nahorny, P. V. (2023). Freight transportation market in Ukraine: Analysis of the current state, wartime challenges, and development prospects. *Entrepreneurship and Trade*, (38), 19-28.

10. Kyiv School of Economics. (2024). \$155 billion – the total amount of damages caused to Ukraine’s infrastructure due to the war – KSE Institute estimate as of January 2024. Retrieved from <https://kse.ua/ua/about-the-school/news/zagalna-suma-zbitkiv-zavdana-infrastrukturi-ukrayini-zrosla-do-mayzhe-155-mlrd-otsinka-kse-institute-stanom-na-sichen-2024-roku/> (Accessed April 26, 2024).

11. KSE Institute. (2024). Report on direct damage to infrastructure caused by Russia’s military aggression against Ukraine as of early 2024. Kyiv: KSE Institute, 39 p.

12. Muzykin, M. I., Lysogorya, M. S., Strusevych, Y. V., & Nechaiev, M. S. (2023). Modern ways of ensuring the sustainability of transportation infrastructure objects under the conditions of the state of war. *Intelligent Transport Technologies: Proceedings of the IV International Scientific-Technical Conference*. Kharkiv: UkrDUZT, p. 363.

13. War in Ukraine: Economy, business, logistics, assistance. (2024). Retrieved from <https://trans.info/ru/viyina-v-ukrayini-ekonomika-biznes-logistika-dopomoga-279148> (Accessed on 14.05.2024).

14. Freight market in 2022. (2024). TradeMasterGroup. Retrieved from <https://trademaster.ua/articles/313620> (Accessed April 30, 2024).

-
15. National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine. (2022). *Proceedings of the XVIII International Scientific Conference «Rational use of energy in technology. TechEnergy 2022» (May 17–19, 2022)*. Kyiv: National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine, 234 p.
 16. Ivanushko, A. Y., & Kalinichenko, O. P. (2018). Improvement of freight transportation in international communication. *Proceedings of the XII All-Ukrainian Scientific-Practical Conference of Students and Graduate Students «Increasing the Reliability of Machines and Equipment»*, Kropyvnytskyi: KNTU, pp. 152–155.
 17. Ukrainian State University of Science and Technology. (2022). *Logistics and transport security: problems and development prospects in the context of analyzing current challenges and threats* (Proceedings of the All-Ukrainian Scientific Conference). Dnipro: Ukr. State Univ. of Science and Technology, 192 p.
 18. Verkhovna Rada of Ukraine. (2024). *On Humanitarian Aid: Law of Ukraine No. 1192-XIV of October 22, 1999* (as of January 23, 2024). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1192-14#Text> (Accessed April 23, 2024).
 19. Humanitarian Aid Portal. (2024). Retrieved from <https://help.gov.ua/> (Accessed April 23, 2024).
 20. *Doings and Sayings (Slovo i Dilo)*. (2023). Which allied countries contribute the most to Ukraine's victory. Retrieved from <https://www.slovoidilo.ua/2023/07/17/infografika/ekonomika/yaki-krayiny-soyuznyky-roblyat-najbilshyj-vnesok-peremohu-ukrayiny> (Accessed April 29, 2024).
 21. Lypytschuk, O. (2022). Trends in the development of the volunteer movement in Ukraine. *Scientific Collection «InterConf»*, (118), 180-188. Retrieved from <https://archive.interconf.center/index.php/conference-proceeding/article/view/1030> (Accessed May 14, 2024).
 22. Vholos. (2024). Top 7 charitable organizations of Ukraine. *Vgolos Information Agency*. Retrieved April 14, 2024, from https://vgolos.ua/news/top-7-blagodiynih-organizacij-ukrayini_1428137.html.
 23. Charitable Foundation «Volunteering and Help Center». (2024). VHC Volunteering and Help Center. Retrieved from <https://vdc.in.ua/> (Accessed April 24, 2024).

ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

УДК 528.8:528.7:528.4:528.06

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.16>

Альперт С. І., кандидат технічних наук, доцент,
науковий співробітник відділу геоінформаційних технологій
в дистанційному зондуванні Землі
«Науковий Центр аерокосмічних досліджень Землі ІГН НАН України»,
доцент кафедри аерокосмічної геодезії та землеустрою
факультету наземних споруд і аеродромів
Національного авіаційного університету
ORCID: 0000-0002-7284-6502

НОВІТНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ ДАНИХ ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

Дистанційне зондування Землі – це сучасна методика отримання інформації про об'єкти за допомогою даних, отриманих зі спеціальної апаратури, що фізично не контактує із досліджуваними об'єктами. Дистанційне зондування надає інформацію про об'єкти земної поверхні на основі аналізу електромагнітного випромінювання, відбитого або випроміненого цими об'єктами. Сучасні методи та технології дистанційного зондування Землі дозволяють відрізняти між собою різні об'єкти земної поверхні, аналізувати їх стан та зміни протягом часу, робити прогнозні оцінки. Дана методика використовується у багатьох сферах, таких як: геологія, екологія, геофізика, географія, гідрологія, океанографія, метеорологія. Застосування дистанційного зондування Землі включає в себе два основних етапи: одержання даних та обробку даних. Дистанційне зондування дає можливість виявляти та класифікувати об'єкти на Землі. Однією із найбільш складних процедур обробки даних є процедура класифікування. Класифікування базується на тому, що різні об'єкти мають різні спектральні характеристики. Процедура класифікування полягає у класифікуванні всіх пікселів зображення з метою побудови карти земного покриву. Існує багато різноманітних підходів до класифікування, які широко використовуються для вирішення різних задач, такі як метод максимальної правдоподібності, метод мінімальної відстані, метод паралелепіпедів, метод опорних векторів. Проаналізовано основні переваги та недоліки даних методів. Також було зазначено, що багато підходів до класифікування не здатні обробляти нечітку та суперечливу інформацію. Тому було запропоновано застосувати теорію свідчень Демпстера-Шейфера та правило комбінування Ягера для класифікування неточних та суперечливих даних, отриманих із різних спектральних каналів. Застосування теорії свідчень Демпстера-Шейфера дозволяє обійти певні обмеження теорії ймовірностей. У цій роботі також було наведено формулу правила комбінування Ягера. Зазначено, що правило комбінування Ягера дозволяє швидко та легко обробляти інформацію. У статті було детально розглянуто числовий приклад класифікування із використанням теорії свідчень Демпстера-Шейфера та правила комбінування Ягера. Було зауважено, що вибір методу класифікування залежить від конкретної задачі. Описані методи обробки аерокосмічних зображень можуть бути застосовані для вирішення різних актуальних екологічних, сільськогосподарських і практичних задач.

Ключові слова: дистанційне зондування Землі, методи класифікування, спектральні канали, теорія свідчень Демпстера-Шейфера, правило комбінування Ягера.

Alpert S. I. Modern methods of Remote data processing

Remote sensing is the modern technique of obtaining information about the objects by data collected from special apparatus that are not physically in contact with the objects being studied. Remote sensing provides information about objects at the surface of the Earth based on analysis of electromagnetic radiation reflected or emitted from these objects. Modern methods and technologies of remote sensing of the Earth make it possible to distinguish different objects at the surface of the Earth, to analyze these objects and changes, make predictive assessments. This technique is applied for numerous fields, such as: geology, ecology, geophysics, geography, hydrology, oceanography, meteorology. Remote-sensing application involves two distinct processes: data acquisition and data processing. One of the most difficult data processing procedures is the classification procedure. Classification is based on that fact, that different objects have a different spectral reflectance. Classification procedure is defined as the process of categorizing all pixels in an image to obtain land cover map. There are different classification approaches that have been developed and widely applied for solution of various tasks, such as maximum likelihood method, minimum distance method, parallelepiped classification, Support vector machines (SVM). It were analyzed main advantages and disadvantages of these methods. It also was noted, that many classification approaches can not process vague and conflicting information. It was proposed to apply the Dempster-Shafer evidence theory and Yager's combination rule for classification of ambiguous and contradictory data from different spectral bands. The application of Dempster-Shafer evidence theory arises from the necessity

to overcome some limitations of Probability Theory. It was also considered a formula of Yager's combination rule in this work. It was noted, that Yager's combination rule can quickly and easy process information. It was considered the numerical example, where Dempster-Shafer evidence theory and Yager's combination rule were applied for classification in this paper. It was noted, that choice of classification method depends of specific task. Described methods for aerospace image processing can be applied in different actual ecological, agriculture and practical tasks.

Key words: *remote sensing, classification methods, spectral bands, Dempster-Shafer evidence theory, Yager's combination rule.*

Постановка проблеми. На даний час дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) є одним із сучасних та потужних інструментів для спостереження та оцінки об'єктів земної поверхні, а саме: земного покриття, ґрунтів, рослинності, водних об'єктів, тощо. Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ) – це процес отримання інформації про об'єкти або явища на поверхні Землі без безпосереднього контакту з ними. Використання даних ДЗЗ для проведення моніторингу навколишнього середовища, вирішення екологічних задач та управління природними ресурсами є досить перспективним напрямком, що відіграє важливу роль для забезпечення сталого розвитку та збереження природного середовища. Слід зазначити, що інтеграція даних, отриманих із використанням засобів та технологій ДЗЗ з іншими типами геопросторової інформації (наземними спостереженнями, кліматичними даними, картами) дає можливість проводити комплексне дослідження стану природних ресурсів.

Розвиток та вдосконалення технологій ДЗЗ, зокрема, космічних та авіаційних засобів для проведення моніторингу земної поверхні, дозволяє вирішувати широкий спектр актуальних природно-ресурсних задач. Застосування сучасних статистичних та математичних методів дозволяє автоматизувати та полегшувати процес обробки, аналізу та класифікування великих обсягів даних ДЗЗ.

Актуальність даної роботи зумовлена необхідністю розробки науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору відповідних методів аналізу, обробки та класифікування даних ДЗЗ для ефективного розв'язку природно-ресурсних завдань, що, сприяє підвищенню ефективності застосування інформації, отриманої із використанням технологій ДЗЗ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У даній статті було розглянуто матеріали для проведення порівняльного аналізу методів класифікування аерокосмічних зображень.

У статті Венга К. та Лу Д. було детально проаналізовані сучасні методи класифікування аерокосмічних зображень, їх переваги, недоліки та особливості застосування [5].

У статті Жанга С. були розглянуті методи обробки та аналізу гіперспектральних космічних зображень [3].

У роботах Шейфера Г., Таруна А. та Яна Дж. були детально описані основи теорії свідчень Демпстера-Шейфера, означення «базової ймовірності (базової маси)» та умови, за наявності яких слід використовувати дану теорію [8-9].

У статті Ягера Р. було проведено порівняльну характеристику різних методів комбінування даних, одержаних із різних джерел (різних спектральних каналів). Також було обґрунтовано використання правила комбінування Ягера за наявності великої кількості суперечливих даних [10].

Отже, **мета дослідження** полягає у проведенні порівняльного аналізу методів обробки, зокрема, методів класифікування даних ДЗЗ.

Виклад основного матеріалу. Обробка даних є основним етапом у процесі вирішення природно-ресурсних задач ДЗЗ. При цьому вибір відповідних підходів та методів залежить від типу даних та конкретної досліджуваної задачі.

Слід зазначити, що процес класифікування є однією із найскладніших та найважливіших процедур обробки аерокосмічних зображень, отриманих із використанням сучасних засобів та технологій ДЗЗ.

Класифікування – це процес обробки сигналів аерокосмічного зображення, результатом якого є віднесення кожного з об'єктів (пікселів зображення), які знаходяться в межах досліджуваної ділянки, до певного класу. Тобто класифікування аерокосмічних зображень – це розділення пікселів на окремі класи (категорії), що відповідають різним об'єктам земної поверхні.

На сьогоднішній день існує велика кількість різноманітних методів та алгоритмів класифікування. При цьому вибір алгоритму класифікування залежить від типу даних та кількості класів. Зазвичай, процес класифікування складається з кількох кроків. На першому кроці проводиться попередня обробка даних, яка включає атмосферну, геометричну та радіометричну корекцію. На другому кроці проводиться підготовка навчальних вибірок. Слід зазначити, що навчальні вибірки – це ділянки зображення з відомою приналежністю до певного класу, що застосовуються для налаштування параметрів алгоритму класифікування. На третьому кроці проводиться процедура класифікування, а саме проводиться навчання класифікатора на основі відібраних навчальних вибірок, а кожен піксель відноситься до відповідного класу. На четвертому кроці проводиться постобробка результатів класифікування (фільтрація шумів, згладжування меж між класами, тощо) [3].

На даний час для вирішення задач ДЗЗ широко застосовуються методи як і контрольованого так і неконтрольованого класифікування.

Будь-який метод контрольованого класифікування вимагає наявності навчальних вибірок, що, в свою чергу, дає змогу визначити еталонні спектральні ознаки кожного із даних класів та встановити алгоритм переходу від показників спектральної яскравості до класів об'єктів. Такий метод називається класифікуванням із навчанням.

На той випадок, коли немає навчальних вибірок і не можна одержати еталонні спектральні ознаки для класів, існують методи і алгоритми неконтрольованого класифікування. На відміну від контрольованого класифікування неконтрольоване класифікування дає можливість об'єднувати пікселі у групи або кластери за формальною ознакою, тобто проводиться розділення всіх пікселів зображення на кластери, спектральні характеристики та назви яких є заздалегідь невідомими. При цьому критерієм віднесення пікселів до певного кластеру є подібність спектральних характеристик. Неконтрольоване класифікування потребує мінімум навчальних даних для виділення кластерів, але воно є менш точним ніж контрольоване класифікування.

Слід зазначити, що існує багато критеріїв кластеризації. Суть даних критеріїв полягає у спеціальному групуванні точок, тобто у віднесенні точок до кластерів таким чином, щоб відстані між точками всередині кластера були мінімальними, а відстані між кластерами-максимальними. Відстань між групами точок обчислюється різноманітними способами. Найбільш розповсюдженою мірою відстані між двома точками X_i та X_j є евклідова метрика, яка розраховується за наступною формулою (1):

$$d_e(X_i, X_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ki} - x_{kj})^2}, \quad (1)$$

де $X_i = (x_{i1}, \dots, x_{pi})$, $X_j = (x_{j1}, \dots, x_{pj})$.

При цьому в задачах класифікування найчастіше використовується критерій суми квадратів похибок $-\sum_{kn}$. Даний критерій обчислюється за формулою (2):

$$\sum_{kn} = \sum_{i=1}^m \sum_{X \in C_i} \|X - M_i\|^2, \quad (2)$$

де m – кількість кластерів,

X_i – набір точок, які належать i -му кластеру,

M_i – вектор математичного сподівання для i -го кластера,

$\|X - M_i\|$ – евклідова відстань між X та M_i .

Тобто за формулою (2) розраховується сума квадратів похибок.

При класифікуванні аерокосмічних зображень найбільш часто використовують наступні методи контрольованого класифікування: максимальної правдоподібності, паралелепіпедів, мінімальної відстані, метод опорних векторів SVM, метод класифікування за спектральним кутом.

Розглянемо деякі методи контрольованого класифікування. Метод паралелепіпедів застосовується для класифікування аерокосмічних зображень у випадку, якщо області значень спектральної яскравості об'єктів не перетинаються. При цьому даний метод використовує статистичні показники навчальної вибірки для K спектральних каналів (спектральних діапазонів). Для кожного класу l та спектрального діапазону k обчислюється середнє значення яскравості в навчальній вибірці, що, в свою чергу, позначається μ_{lk} . Далі згідно алгоритму даного методу, кожен піксел відносимо до класу l тоді і тільки тоді, коли його яскравість BV_{ijk} задовольняє наступній умові:

$$\mu_{lk} - 2\delta_{lk} \leq BV_{ijk} \leq \mu_{lk} + 2\delta_{lk}, \quad (3)$$

де $k = 1, 2, 3, \dots, K$ – порядковий номер спектрального діапазону,

$l = 1, 2, 3, \dots, L$ – порядковий номер класу,

μ_{lk} – середнє значення яскравості в навчальній вибірці класу l та спектрального діапазону k .

Далі для зручності позначимо нижню та верхню границі цієї нерівності (3) наступним чином:

$$L_{lk} = \mu_{lk} - 2\delta_{lk};$$

$$H_{lk} = \mu_{lk} + 2\delta_{lk},$$

Тоді нерівність (3) можемо записати у вигляді (4):

$$L_{lk} \leq BV_{ijk} \leq H_{lk}. \quad (4)$$

Також слід зазначити, що множина точок, що задовольняють даній умові (4), утворюють паралелепіпед в просторі спектральних ознак. Далі користуємося наступним алгоритмом, який полягає у тому, що, якщо значення спектральної яскравості пікселя знаходиться всередині цього паралелепіпеда, то цей піксель має бути віднесений до даного класу. Перевагою даного методу є те, що він не потребує складних обчислень, які займають багато часу. Недоліком даного методу є те, що на зображенні можуть залишитися некласифіковані пікселі.

Ще одним із найбільш відомих методів контрольованого класифікування є метод мінімальної відстані. Алгоритм даного методу полягає у тому, що піксель має бути віднесений до того еталонного класу, евклідова відстань до центра якого в просторі спектральних ознак є мінімальною. Даний метод слід застосовувати у випадку, коли спектральні ознаки різних класів подібні, а діапазони значень їх спектральної яскравості перетинаються.

Згідно з алгоритмом методу мінімальної відстані розраховуються спектральні відстані до всіх класів, тобто розраховується мінімальна відстань між вектором значень пікселя-кандидата (пікселя, що маємо віднести до певного класу) та вектором середніх значень кожної навчальної вибірки для кожного класу за формулою (5):

$$SD_{xyl} = \sqrt{\sum_{i=1}^K (\mu_{ik} - X_{xyk})^2}, \quad (5)$$

де l – поточний клас;

K – кількість спектральних каналів;

k – поточний спектральний канал;

X_{xyk} – значення яскравості пікселя з координатами x, y у спектральному каналі k ;

μ_{lk} – середнє значення яскравості пікселя в спектральному каналі k для навчальної вибірки, що відповідає класу l .

SD_{xyl} – спектральна відстань від пікселя з координатами x, y до точки, яка задає піксель-кандидат, тобто той піксель, який треба класифікувати.

Далі піксель-кандидат має бути віднесений до того класу, для якого відстань SD є мінімальною.

Метод мінімальної відстані є досить швидким та не залишає неklasифікованих пікселів. Слід зауважити, що недоліком даного методу є те, що для групи пікселів з невеликою варіацією яскравості проводиться багато зайвих операцій [3; 5].

Метод опорних векторів (Support Vector Machine, SVM) базується на принципах машинного навчання та на побудові оптимальної розділюючої гіперплощини між двома класами. При цьому оптимальна гіперплощина – це гіперплощина, відстань до якої від самих близьких точок двох класів є максимальною.

Припустимо, що кожен вектор ознак x характеризується наступною парою (y, c) , де y – нормований вектор ознак, а c приймає значення «-1» або «+1» в залежності від того, до якого класу належить вектор ознак.

Тоді вираз для розділюючої площини можна записати за допомогою наступної формули:

$$w \cdot y - b = 0, \quad (6)$$

де b – відстань від гіперплощини до початку координат,

w – перпендикуляр до розділюючої площини.

Задача побудови оптимальної гіперплощини зводиться до задачі квадратичної оптимізації, а саме мінімізації наступного виразу:

$$\begin{cases} \|w\| \rightarrow \min, \\ c(w \cdot y - b) \geq 1 \end{cases} \quad (7)$$

Зауважимо, що метод SVM є одним із найбільш точних методів класифікування аерокосмічних зображень, але водночас вимагає досить складних обчислень для проведення процедури оптимізації. Даний метод широко застосовується для проведення класифікування зображень із великою кількістю спектральних каналів та за наявності обмеженої кількості навчальних вибірок.

Метод максимальної правдоподібності є одним із найпоширеніших методів класифікування. Даний метод базується на статистичному аналізі спектральних характеристик пікселів та використанні ймовірності, з якою конкретний піксель належить до певного класу.

Далі для кожного класу визначаються репрезентативні навчальні вибірки. При застосуванні даного методу припускається, що значення яскравостей пікселів у межах кожного класу повинні мати нормальний розподіл.

Кожен піксель має бути віднесений до того класу, до якого він належить із найбільшою ймовірністю. Обчислюючи ймовірність, слід враховувати спектральну яскравість пікселя та спектральну яскравість пікселів, що його оточують.

Основна ідея алгоритму методу максимальної правдоподібності базується на тому, що піксель x належить до класу l тоді і тільки тоді, якщо

$$p_l > p_i, \quad i = 1, \dots, L,$$

де p_i – ймовірність того, що піксель належить i -му класу,

L – загальна кількість класів.

Зауважимо, що ймовірність p_l визначається за наступною формулою:

$$p_l = \left[-0,5 \log \{ \det(V_l) \} \right] - 0,5 \left((X - M_l)^T (V_l)^{-1} (X - M_l) \right), \quad (8)$$

де M_l – середній вектор вимірювань для l -го класу,
 V_l – коваріаційна матриця для l -го класу.

Розглянутий метод має досить високу точність та не залишає неklasифікованих пікселів, але потребує великого об'єму машинної пам'яті та багато часу для проведення розрахунків [3; 5].

Зауважимо, що метод максимальної правдоподібності базується на теорії ймовірностей та класичному понятті ймовірності, для якої виконуються наступні умови:

1) $p(\Omega) = 1$;

де Ω – простір елементарних подій.

2) Якщо $A \subset B$, то має виконуватися умова умова: $p(A) \leq p(B)$;

3) $p(A) + p(\bar{A}) = 1$, де \bar{A} – доповнення до множини A , тобто:

$$A \cup \bar{A} = \Omega, \quad A \cap \bar{A} = \emptyset.$$

Також, слід зазначити, що більшість методів класифікування аерокосмічних зображень, як і метод максимальної правдоподібності, базується на використанні класичного поняття ймовірності. Але у випадку, коли вхідна необхідна для класифікування інформація, отримана із різних джерел (спектральних каналів), є невизначеною та неповною, ймовірнісні методи, дають неточні результати. Тому у таких випадках слід використовувати метод класифікування, який заснований на теорії свідчень Демпстера-Шейфера [4].

Теорія свідчень Демпстера-Шейфера є узагальненням теорії ймовірностей застосовується для класифікування аерокосмічних зображень за наявності неповної, неточної та суперечливої інформації. При цьому у даній теорії замість класичного поняття «ймовірності» використовується поняття «базової маси» чи «базової ймовірності». Базова ймовірність є узагальненням поняття ймовірності, що дає змогу розрізнити відсутність довіри та недовіри. У випадку класифікування аерокосмічних зображень піксель має бути віднесений до того класу, до якого він належить із найбільшою базовою ймовірністю (базовою масою). Іншими словами базова маса є мірою довіри до гіпотези, що стверджує приналежність пікселя певному класу.

Далі розглянемо основні поняття теорії свідчень Демпстера-Шейфера [6-7].

Основа аналізу Ω – це сукупність вихідних вичерпних та взаємно виключних гіпотез відносно стану об'єкта та всіх їх можливих сполучень. Тобто Ω – це множина елементів, при чому елементами можуть бути події, об'єкти, гіпотези чи явища.

Слід зауважити, що Ω містить підмножин (Q – кількість гіпотез).

Далі наведемо означення базової маси (базової ймовірності). Отже, базова маса – це така функція m , яка задовольняє умовам (7):

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0, \\ \sum_{A_i \subseteq A_0} m(A_i) = 1, \quad (i = 0, 1, 2, \dots), \end{cases} \quad (9)$$

де A_0 – обмежена множина,

A_i ($i = 1, 2, \dots$) – підмножини множини A_0 .

Також для базової ймовірності є справедливими наступні умови:

1) $m(\Omega) \neq 1$;

2) якщо $A \subset B$, то не обов'язково, щоб виконувалася нерівність: $m(A) \leq m(B)$;

3) не вимагається взаємозв'язок між $m(A)$ та $m(\bar{A})$,

де \bar{A} – доповнення до множини A , тобто:

$$A \cup \bar{A} = \Omega, \quad A \cap \bar{A} = \emptyset.$$

Алгоритм класифікування на основі теорії свідчень Демпстера-Шейфера полягає у віднесенні пікселя до того класу, до якого він належить із найбільшою базовою ймовірністю (базовою масою). При цьому правило комбінування Ягера дає змогу об'єднати базові ймовірності приналежності пікселя до певного класу, враховуючи різні спектральні канали. Тобто, для визначення приналежності пікселя конкретному класу, враховується інформація, отримана із різних джерел (спектральних діапазонів). Далі розглянемо правило комбінування Ягера та його застосування [10]. Ідея правила комбінування Ягера полягає у наданні маси перетинів конфліктних множин, що в перетині дають пусту множину базовій множині. Слід зазначити, що ненульова маса пустої множини \emptyset розподіляється серед елементів базової множини.

Базова ймовірність за правилом Ягера розраховується наступним чином:

$$m(A) = \sum_{B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n = A} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(B_i), \quad (10)$$

$$A \neq \emptyset, \Omega,$$

де Ω – основа аналізу.

$$m(\Omega) = \sum_{B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n = \Omega} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(B_i) + K, \quad (11)$$

$$\text{де } K = \sum_{B_1 \cap B_2 \cap \dots \cap B_n = \emptyset} \prod_{1 \leq i \leq n} m_i(B_i). \quad (12)$$

K – коефіцієнт конфліктності, а саме, маса, яка надається базовій множині після комбінування, $m(\emptyset) = 0$.

Приклад

Класифікування із застосування правила Ягера з метою визначення приналежності об'єкта (пікселя) на знімку до одного із 3 класів («Вода», «Ліс», «Поле»). У даному випадку Ω буде мати наступний вигляд, а саме: $\Omega = \{A, B, C\}$.

Гіпотеза A стверджує, що полігон належить до класу «Вода», B стверджує, що полігон належить до класу «Ліс», C стверджує, що полігон належить до класу «Поле».

Нехай, маємо 2 джерела свідчень (2 спектральні канали), які, призначають різні базові ймовірності гіпотезам A, B, C . Метою даної задачі є скомбінувати базові ймовірності, отримані з двох спектральних каналів, застосовуючи правило комбінування Ягера для трьох гіпотез A, B, C .

На основі 1 – го спектрального каналу призначені наступні базові ймовірності підмножинам Ω :

$$m_1(\{A\}) = 0,6; \quad m_1(\{B\}) = 0,2; \quad m_1(\{A, C\}) = 0,2.$$

На основі 2 – го спектрального каналу призначені базові ймовірності підмножинам Ω :

$$m_2(\{B\}) = 0,1; \quad m_2(\{A, C\}) = 0,5; \quad m_2(\{A, B\}) = 0,4.$$

У таблиці 1 відображені всі перетини даних гіпотез та їх базові ймовірності.

Таблиця 1

Комбінування базових ймовірностей із використанням теорії свідчень Демпстера-Шейфера та правила Ягера

Базові маси m_1 та m_2	$m_1(\{A\})$ 0,6	$m_1(\{B\})$ 0,2	$m_1(\{A, C\})$ 0,2
$m_2(\{B\})$ 0,1	\emptyset 0,06	$\{B\}$ 0,02	\emptyset 0,02
$m_2(\{A, C\})$ 0,5	$\{A\}$ 0,3	\emptyset 0,1	$\{A, C\}$ 0,1
$m_2(\{A, B\})$ 0,4	$\{A\}$ 0,24	$\{B\}$ 0,08	$\{A\}$ 0,08

Комбіновані значення базових ймовірностей визначаються наступним чином:

$m(\{A\}) = 0,6 \cdot 0,5 + 0,6 \cdot 0,4 + 0,2 \cdot 0,4 = 0,62$ – базова ймовірність того, що піксель належить класу «Вода»;

$m(\{B\}) = 0,2 \cdot 0,1 + 0,2 \cdot 0,4 = 0,1$ – базова ймовірність того, що піксель належить класу «Ліс»;

$m(\{A, C\}) = 0,2 \cdot 0,5 = 0,1$ – базова ймовірність того, що піксель належить до класу «Вода» або до класу «Поле»;

$$m(\{\emptyset\}) = 0,6 \cdot 0,1 + 0,2 \cdot 0,5 + 0,2 \cdot 0,1 = 0,18.$$

Оскільки базова маса приналежності полігону до класу «Вода» є максимальною, то в результаті маємо, що найбільш вірогідним є те, що піксель належить до класу «Вода».

Далі, аналогічним чином застосовуємо даний алгоритм класифікування до інших пікселів зображення, та визначаємо приналежність конкретним класам усіх пікселів.

Висновки. На даний час дистанційне зондування Землі є потужним інструментом для моніторингу, аналізу та оцінки стану об'єктів земної поверхні, а саме: рослинності, ґрунтів, водних об'єктів, різних компонентів екосистем.

Дані ДЗЗ забезпечують об'єктивність, регулярність та періодичність спостережень, дозволяють охоплювати великі та важкодоступні регіони. Водночас, використання даних ДЗЗ залежить від математичних методів обробки та аналізу аерокосмічних даних, а також від технічного та програмного забезпечення.

При цьому дослідження підходів до обробки та інтерпретації даних ДЗЗ показало, що ефективність їх використання залежить від вибору відповідних методів обробки для конкретної задачі, врахування специфіки досліджуваних природних об'єктів земної поверхні та від інтеграції даних ДЗЗ з іншими джерелами геопросторової інформації [1-2].

У даній роботі було проведено порівняльний аналіз методів класифікування аерокосмічних зображень, а саме: метод мінімальної відстані, метод максимальної правдоподібності, метод паралелепіпедів, метод опорних векторів (SVM), метод класифікування на основі теорії свідчень Демпстера-Шейфера та правила комбінування Ягера. Зазначено, що у випадку наявності неповних, невизначених та суперечливих даних слід застосовувати підходи до класифікування на основі теорії свідчень Демпстера-Шейфера, яка є узагальненням теорії ймовірностей. Математичний апарат теорії свідчень дозволяє оперувати не тільки з окремими гіпотезами, але й зі сполученнями гіпотез. Також було наведено основні відмінності між теорією свідчень Демпстера-Шейфера та теорією ймовірностей. Наголошувалося на тому, що усі методи класифікування мають свої переваги та недоліки, тобто універсального методу класифікування не існує і для кожної конкретної задачі треба підбирати свій відповідний метод [3-5].

Також у статті було розглянуто числовий приклад класифікування із використанням теорії свідчень Демпстера-Шейфера та правила комбінування Ягера.

Використання сучасних методів та технологій ДЗЗ є перспективним напрямком для вирішення численних екологічних, сільськогосподарських, геологічних та природно-ресурсних задач.

Список використаних джерел:

1. Alpert S. I. Data combination method in Remote Sensing tasks in case of conflicting information sources. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2021. Vol. 8(3). P. 44–48.
2. Alpert S. The new approach to applying the Dezert – Smarandache theory in land-cover classification in uav-based remote sensing. *Management of Development of Complex Systems*. 2022. Vol. 49. P. 33–39. dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2022.49.33-39.
3. Chang C. I. Hyperspectral data processing: Algorithm design and analysis. *Hoboken, N J: John Willey and Sons*. 2013. 1164 p.
4. Inagaki T. Interdependence between Safety-Control Policy and Multiple-Sensor Schemes Via Dempster-Shafer Theory. *IEEE Transactions on Reliability*. 1991. Vol. 40(2). P. 182–188.
5. Lu D., Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*. 2007. Vol. 28(5). P. 823–870.
6. Mertikas P., Zervakis M. E. Exemplifying the Theory of Evidence in Remote Sensing Image Classification. *Int. Journal of Remote Sensing*. 2001. Vol. 22(6). P. 1081–1095.
7. Popov M., Alpert S., Podorvan V., Topolnytskyi M., Mieshkov S. Method of Hyperspectral Satellite Image Classification under Contaminated Training Samples Based on Dempster-Shafer's Paradigm. *Central European Researchers Journal*. 2015. Vol. 1(1). P. 86–97.
8. Shafer G. A Mathematical Theory of Evidence. *Princeton, NJ: Princeton University Press*. 1976. P. 875–883.
9. Taroun A., Yang J. B. Dempster-Shafer theory of evidence: Potential usage for decision making and risk analysis in construction project management. *The Built & Hum. Environ. Rev*. 2011. Vol. 4(1). P. 155–166.
10. Yager R. On the Dempster-Shafer framework and new combination rules. *Inf Sci*. 1987. Vol. 41. P. 93–137.

References:

1. Alpert, S. (2022). The new approach to applying the Dezert – Smarandache theory in land-cover classification in uav-based remote sensing. *Management of Development of Complex Systems*, 49, 33–39. dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2022.49.33-39.
2. Alpert, S. I. (2021). Data combination method in Remote Sensing tasks in case of conflicting information sources. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 8(3), 44–48.
3. Chang, C. I. (2013). Hyperspectral data processing: Algorithm design and analysis. *Hoboken, N J: John Willey and Sons*, 1164 p.
4. Inagaki, T. (1991). Interdependence between Safety-Control Policy and Multiple-Sensor Schemes Via Dempster-Shafer Theory. *IEEE Transactions on Reliability*, 40(2), 182–188.
5. Lu, D., Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823–870.
6. Mertikas, P., Zervakis, M. E. (2001). Exemplifying the Theory of Evidence in Remote Sensing Image Classification. *Int. Journal of Remote Sensing*, 22(6), 1081–1095.
7. Popov, M., Alpert, S., Podorvan, V., Topolnytskyi, M., Mieshkov, S. (2015). Method of Hyperspectral Satellite Image Classification under Contaminated Training Samples Based on Dempster-Shafer's Paradigm. *Central European Researchers Journal*, 1(1), 86–97.
8. Shafer, G. A. (1976). Mathematical Theory of Evidence. *Princeton, NJ: Princeton University Press*, 875–883.
9. Taroun, A., Yang, J. B. (2011). Dempster-Shafer theory of evidence: Potential usage for decision making and risk analysis in construction project management. *The Built & Hum. Environ. Rev*, 4(1), 155–166.
10. Yager, R. (1987). On the Dempster-Shafer framework and new combination rules. *Inf Sci.*, 41, 93–137.

ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННА СПРАВА

UDC 338.467.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.17>

Boyko Z. V., PhD in Geography, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of International Tourism
and Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0003-0535-3641

Horozhankina N. A., PhD in Geography, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of International Tourism
and Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0003-2773-8630

Korneyev M. V., Doctor of Economics, Professor,
Dean of the Faculty of Innovative Technologies
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-4005-5335

Shcholokova H. V., PhD in Political Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of International Tourism
and Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0001-9396-9184

Umanska S. O.,
University of Customs and Finance
ORCID: 0009-0003-8897-5813

PECULIARITIES OF THE DEVELOPMENT OF GASTRONOMIC TOURISM IN GEORGIA

The article examines the essence of gastronomic tourism and its structure, considers its various definitions developed by foreign and domestic scholars. Gastronomic tourism is one of the types of excursion and educational tourism that was formed at the end of the 20th century. This is a relatively new but extremely interesting direction of the tourism business, which is actively developing, allowing travellers to learn about the cuisine of different countries and ethnic groups. The research uses the methods of structural-logical and semantic analysis (to clarify the terminology and conceptual apparatus of gastronomic tourism); system analysis (to assess the current state and prerequisites for the development of GT in Georgia), statistical method (to assess the place of GT in the tourist industry of Georgia), graphic method (for visual presentation of statistical data). The formation and development of gastronomic tourism in the world, its importance for the formation of the image of the territory are analysed. It is determined that gastronomic tourism is an integral part of all tours, and gastronomy has the potential to increase the attractiveness of the tourist product and tourist destination in general. It is proved that creating a favourable image of a country through the prism of national cuisine is a successful marketing ploy that helps attract tourists. It is intended, on the one hand, for tourists seeking knowledge and experience of new cultures, and, on the other hand, it provides additional value to the brands of tourist destinations. The influence of international (the World Food Travel Association and others) and national gastronomic tourism organisations on its development is characterised. The place of gastronomic tourism in the tourism industry of Georgia and the prospects for its development are analysed. It is proved that the culinary and wine sectors of Georgia play an important role. Thus, the contribution of the "Food and beverage service activities" sector in recent years has been approximately 20% in the GDP structure of the tourism industry. The analysis of the Georgian tourism sector has shown that gastronomic tourism in Georgia has significant potential to contribute to the development of new quality tourism products and experience. For its

© Z. V. Boyko, N. A. Horozhankina, M. V. Korneyev, H. V. Shcholokova, S. O. Umanska, 2024

part, the National Tourism Administration of Georgia is doing its utmost to promote gastronomic tourism both nationally and internationally.

Key words: *gastronomy, gastronomic tourism, culinary tourism, national cuisine, cooking culture, gastro-tour.*

Бойко З. В., Горожанкіна Н. А., Корнєєв М. В., Щолокова Г. В., Уманська С. О. Особливості розвитку гастрономічного туризму в Грузії

У статті досліджено сутність гастрономічного туризму та його структуру, розглянуто різні його дефініції. Проаналізовано особливості становлення та розвитку гастрономічного туризму в світі, його значення для формування іміджу території. Гастрономічний туризм дуже популярний у світі вид туризму, який пов'язаний з культурним, етнічним, подієвим та агротуризмом. Через свою багатогранність гастрономічний туризм має кілька класифікацій, заснованих на різних характеристиках, найважливіша з яких заснована на типі конкретного продукту або напою. Гастрономічний туризм дозволяє людині відчувати культуру певної країни чи регіону через кулінарні дегустації та навчання готувати страви. Завдяки гастрономічним турам і подорожам можна отримати не тільки нові відчуття від поїдання різноманітних страв і дегустації вин, але це також є одним із шляхів проникнення в ту чи іншу культуру. Гастрономія пройшла довгий історичний шлях розвитку. Визначено, що гастрономічний туризм виступає складовим елементом усіх турів, а гастрономія має потенціал для підвищення привабливості туристичного продукту та туристичної дестинації в цілому. Доведено, що формування сприятливого іміджу країни крізь призму національної кухні є вдалим маркетинговим ходом, що сприяє залученню туристів. Він призначений, з одного боку, для туристів, які шукають досвіду ознайомлення з новими культурами, а з іншого боку, він надає додаткову цінність брендам туристичних напрямків. Охарактеризовано вплив міжнародних (Всесвітньої асоціації гастрономічного туризму та інших) та національних організацій гастрономічного туризму на його розвиток. Проаналізовано місце гастрономічного туризму в туристичній індустрії Грузії та перспективи його розвитку. Доведено, що кулінарний та винний сектори Грузії відіграють важливу роль. Аналіз сектору туризму Грузії дозволив встановити, що гастрономічний туризм у Грузії має значний потенціал для сприяння розробці нових якісних туристичних продуктів і досвіду. Зі свого боку Національна адміністрація туризму Грузії робить усе можливе для просування гастрономічного туризму як на національному, так і на міжнародному рівнях.

Ключові слова: *гастрономія, гастрономічний туризм, кулінарний туризм, національна кухня, культура приготування, гастро-тур.*

Problem statement. The field of tourism is actively undergoing changes and innovations. The structure of the tourism industry is quite dynamic. Mass, standard and complex tourism is being replaced by new types and destinations that depend on consumer demand. One of these directions is gastronomic tourism, which is developing rapidly all over the world. Gastronomic tourism (GT) acts as a constituent element of all tours, and gastronomy has the potential to increase the attractiveness of the tourist product and the tourist destination as a whole. Gastronomy has gone through a long historical path of its development. The functioning of organizations of GT only contributes to its development. The most influential international organization in the field of gastronomic tourism is the World Food Travel Association (WFTA). In addition, the popularization of gastronomy in tourist markets takes place thanks to the activities of UNWTO and UNESCO. All countries of the world have prerequisites for the development of GT, and this is a special feature of this type of tourism. But there are already countries about which a certain idea has been formed in the gastronomic tourism market. One of these countries is Georgia. This country has a favourable geographical position, a variety of climatic conditions and traditions of national cuisine, which it successfully uses to promote its tourist product and develop the gastronomic direction of tourism. Georgian cuisine attracts tourists from different regions of the world with its simplicity of ingredients and unique taste. Therefore, the study of the development of gastronomic tourism in Georgia is relevant, especially in the conditions of the recovery of the tourism industry after the COVID-19 pandemic.

Analysis of recent research and publications. Gastronomic tourism is one of the types of excursion and educational tourism that was formed at the end of the 20th century. This is a relatively new but extremely interesting direction of the tourism business, which is actively developing, allowing travellers to learn about the cuisine of different countries and ethnic groups. Currently, there is no consensus on the definition of "gastronomic tourism", both in foreign literature and among Ukrainian scientists. Among foreign scientists, C. Hall and R. Mitchell [1], M. Brokaj [2], G. Gheorghe, P. Tudorache, P. Nistoreanu [3], A. De Jong, M. Palladino, R. Garrido Puig, G. Romeo, N. Fava, C. Cafiero, W. Scoglund, P. Varley, C. Marciano, D. Laven, A. Sjölander-Lindqvist [4], G. Tovmasyan [5], S. Dixit, G. Prayag [6] were engaged in the study of issues of gastronomic tourism, and among domestic researchers – O.V. Nykyha [7], V. Pidgirma, H. Yereimia, M. Khnykina [8], V. Khudaverdiyeva [9], etc. Research devoted to the development of gastronomic tourism in Georgia was highlighted in their works by M. Meladze [10], L. Kadagidze, M. Piranashvili [11].

The goal of the article is to analyse the peculiarities of the development of gastronomic tourism (GT) and determine its place in the tourist industry of Georgia.

Presentation of the main material. The research uses the methods of structural-logical and semantic analysis (to clarify the terminology and conceptual apparatus of gastronomic tourism); system analysis (to assess the current state and prerequisites for the development of GT in Georgia), statistical method (to assess the place of GT in the tourist industry of Georgia), graphic method (for visual presentation of statistical data). Materials presented on the

websites of the Gastronomic Association of Georgia [12], the National Statistics Office of Georgia [13] and other materials were used for the analysis. In the specialized literature, there are several definitions related to gastronomic tourism (Fig. 1).

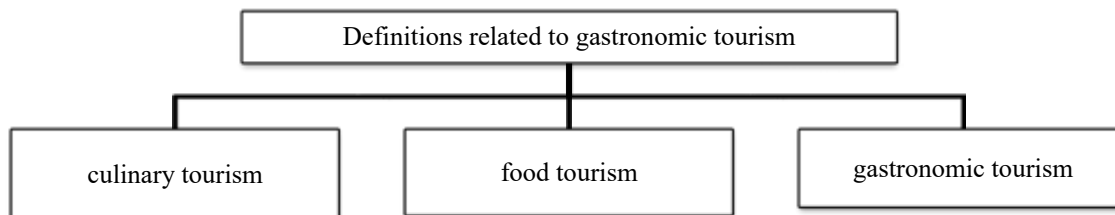


Figure 1. Definitions related to gastronomic tourism

Source: [14]

It is possible to note related concepts, such as culinary tourism, GT, gastro tours and gourmet tours, wine tourism, food tourism, as well as tasting and beer tourism [15].

C. M. Hall and R. Mitchell define gastronomic tourism as a type of tourism that includes visits and tastings of food, gastronomic festivals, food industry enterprises, especially restaurants, and special places related to certain food products, where gastronomic tourism includes observation according to the processes of food production and preparation [1]. Many scientific studies emphasize the advantages of including gastronomy in the brand identity of tourist destinations. Quantitative and qualitative results achieved by some tourism entities confirm the benefits of incorporating gastronomy into nation branding, as well as its role and importance in the development of the local economy [7]. But to develop it, it is necessary to consider the factors that determine the gastronomic culture of a particular area (Fig. 2).

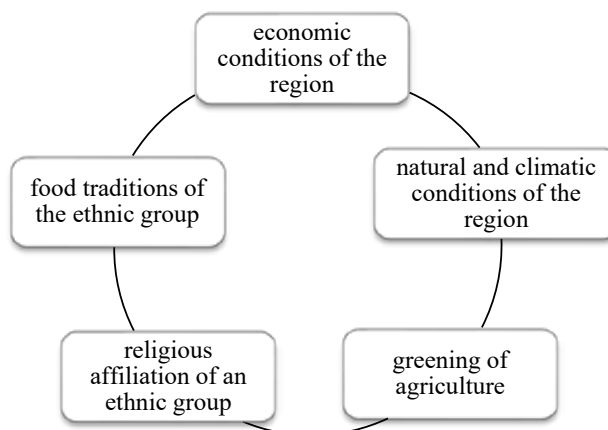


Figure 2. Factors determining the gastronomic culture of the region

Source: [7]

Gastronomy contributes to the development of additional economic value in the regions and is also important for the development of the economy of Georgia as a whole. Gastronomic tourism helps to increase the length of stay and spending of tourists on local goods and services of domestic production.

Tourism as an industry plays a leading role in the structure of the service sector and the economy as a whole (Fig. 3).

The rapid trend of growth of tourism was observed up to and including 2019. In 2019, tourism increased to USD 3.6 billion, which is 1.6 times more than in 2017. The share of the tourism industry also tended to grow and was 8.4% in 2019.

The COVID-19 pandemic has adversely affected the world tourist industry as a whole and Georgia in particular. In 2020, the share of tourism in the GDP structure was less than 6%. But in 2021-2022 the tourism industry began to be restored and in 2022 the total GDP of tourism was more than USD 4.4 billion, and the share of tourism increased to 7.2% [13; 16].

Such dynamics indicate that tourism is one of the main sources of income for the country, so it develops different types of tourism, forms a positive tourist image in the international arena, and attracts investments for the construction of tourism.

Food and drinking service in the tourism industry of Georgia ranks third in GDP. Its share in 2022 was 21%, inferior to land and water transport, as well as services provided by means of accommodation (Fig. 4).

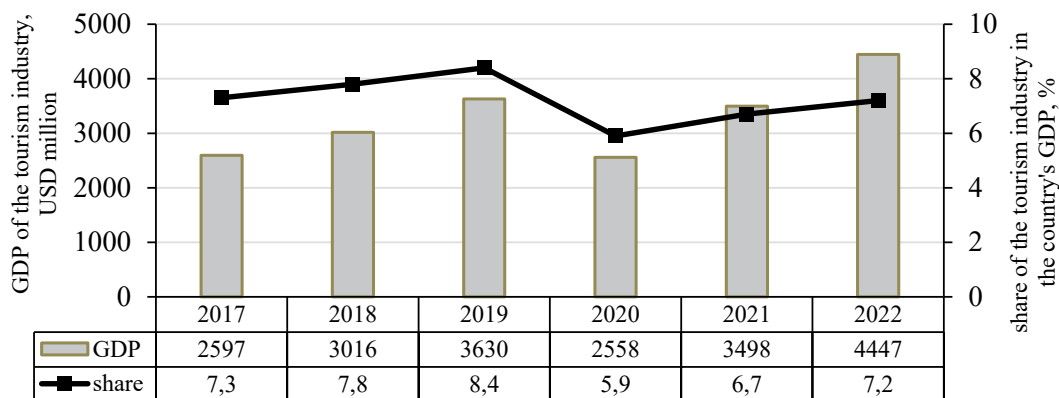


Figure 3. Dynamics of economic indicators of tourism development in Georgia for the period 2017-2022

Source: [13; 16]



Figure 4. The structure of industries in the volume of GDP of the tourist industry of Georgia in 2022

Source: [16]

The share of "Food and drink service activities" in GDP of the tourism industry from 2017 to 2022 has been approximately 20%, reaching its maximum in 2017 (26.1%) and a minimum in 2019 (18.3%). The total absolute contribution of this industry to the country's GDP in 2022 was almost USD 938 million, nearly twice as much as in 2017 (Fig. 5).

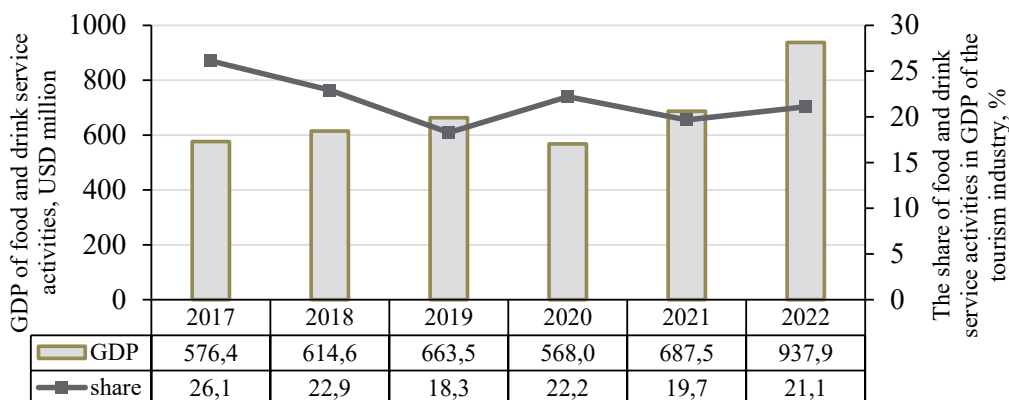


Figure 5. GDP dynamics of the "Food and beverage service activities" industry in Georgia

Source: [16]

Georgia's involvement in global tourist policies expanding its international cooperation in the tourism sector is an important trend, as the local specificity of tourist supply and demand, a modern and planned level of tourism development in regions and individual cities are taken into account. The National Tourism Administration [16],

which takes part in the conduct of domestic and international exhibitions, fairs and other events [17], is engaged in tourism in Georgia.

The result of such actions was an increase in international tourist flows, their number in 2019 amounted to more than 7.7 million people, but because of the COVID-19 pandemic, the Georgian authorities significantly limited the possibility of foreigners visiting the country. In 2020–2021, the number of foreign tourists amounted to 1.5–1.7 million people, but already in 2022 it increased to 4.7 million people (Fig. 6).

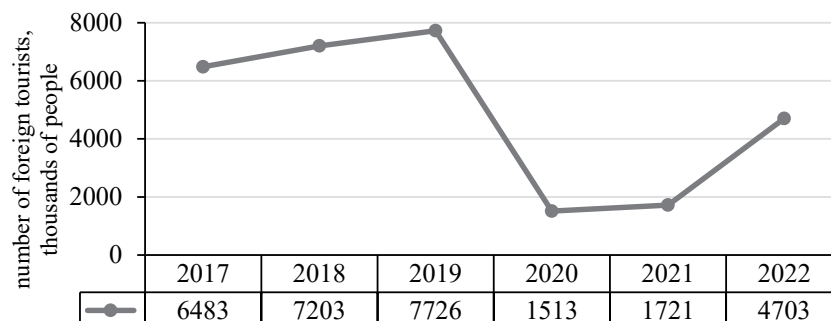


Figure 6. Dynamics of international tourist flows to Georgia for the period 2017–2022

Source: [13; 16]

The most popular regions of Georgia among foreign tourists are Tbilisi, whose share annually is about 50% among all international tourists, Adjara with its centre in Batumi (about 30%), as well as the wine region of Kakheti with its centre in Telavi; Tbilisi, Batumi (and other coastal cities) and Kutaisi are popular among domestic tourists, as well as the mountainous regions of the country, primarily Svaneti [16].

Among the spending groups of international tourists, food and beverage spending has the largest share and accounted for more than 33% in 2022, ahead of accommodation spending. And for domestic tourists, the share of spending on food and drinks is about 24%, inferior to spending on shopping (Fig. 7).

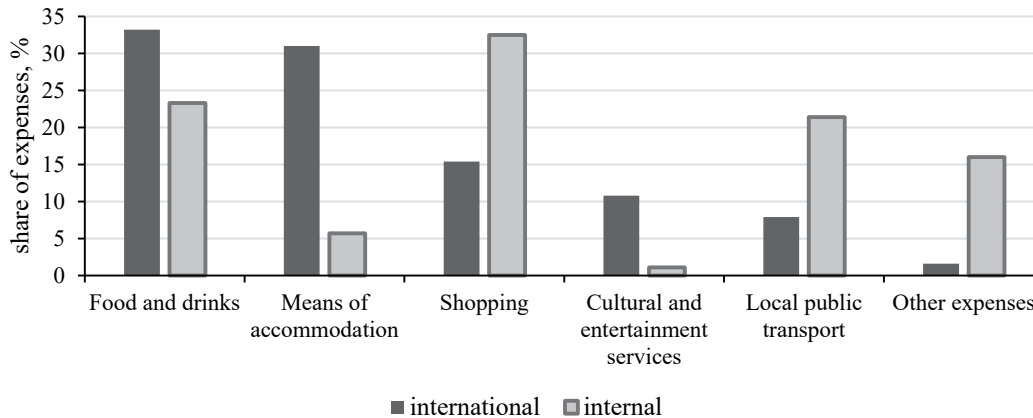


Figure 7. Expenditure of Georgian tourists in 2022

Source: [16]

The Georgian National Tourism Administration [16] and the Gastronomic Association of Georgia [12] promote Georgia's gastronomic tourism on the world stage [18].

Kvevri production is practised throughout Georgia, especially in rural communities where unique grape varieties are grown. A kvevri is an egg-shaped earthenware vessel used to prepare, age, and store wine. The knowledge and experience of kvevri production and winemaking are passed down through families, neighbours, friends and relatives, all of whom join in the collective harvest and winemaking. The winemaking process involves pressing the grapes and then pouring the juice, grape skins, stems and seeds into a kvevri, which is sealed and buried in the ground to allow the wine to ferment for five to six months before it can be consumed. This method of wine preparation is used by most farmers and city dwellers. Wine culture plays an important role in everyday life, as well as in the celebration of secular and religious events and rituals. Wine cellars are still considered the most sacred place in the family home of Georgians. The tradition of kvevri winemaking defines the way of life of local communities and is an integral part of their cultural identity and heritage, and wine and the vine are often mentioned

in Georgian oral traditions and songs. However, it is not advisable to stop there, because the unique Georgian cuisine can be fully included in the intangible heritage of UNESCO, following the example of French or Mexican cuisine.

The National Tourism Administration of Georgia prepared brochures "Food, Wine and Everything Else" and "Guide to Wine Routes". The first one presents general information about the country's gastronomic tourism, provides a map with the designation of gastronomic regions, and briefly describes some Georgian dishes, such as khachapuri, khinkali, etc. The second publication tells in more detail and in-depth about the history of Georgian winemaking, their traditions and customs, the peculiarities of Supra, Georgian grape varieties [19].

In addition, the Internet project "Taste Atlas" contributes to the development of gastronomic tourism in Georgia, which presents information about the most popular products, dishes, drinks and restaurants of the country (Fig. 8).

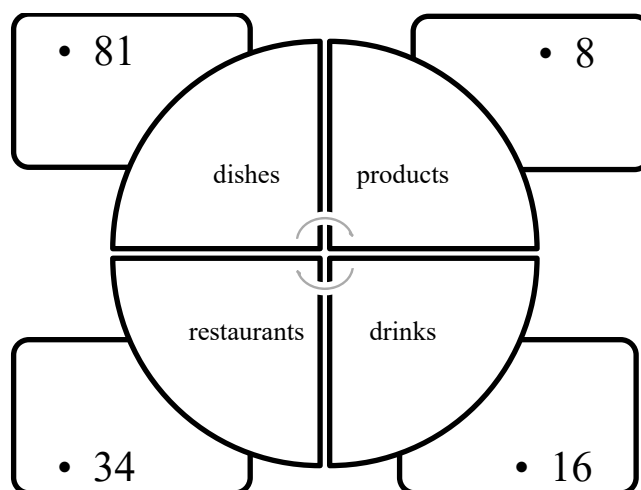


Figure 8. Advertisement of Georgian gastronomy on the Internet project "Taste Atlas"

Source: [20]

The peculiarity of this resource is that it provides recommendations on which dishes to try in which restaurants, as it is based on the reviews of experts and visitors to these establishments, who had the opportunity to determine their features, that is, the tourist only needs to choose. In addition, restaurants are grouped by region, which allows tourists to choose establishments in the cities and regions where they are or are going to be when planning their route. A similar and more popular resource for finding establishments that present national Georgian cuisine is the "Tripadvisor" application, which only in Tbilisi presents 654 establishments of national Georgian cuisine with reviews from visitors, another 259 establishments are presented in Batumi, 87 – in Kutaisi, 32 – in Gudauri, 31 – in Telavi, etc. [21].

Conclusions. Gastronomic tourism is a very popular type of tourism in the world, which has links with cultural, ethnic, event and agrotourism. Due to its multifaceted nature, gastronomic tourism has several classifications based on different characteristics, the most important of which is based on the type of specific product or drink. Gastronomic tourism allows a person to experience the culture of a particular country or region through culinary tastings and learning how to prepare dishes. Thanks to gastronomic tours and travels, it is possible to get not only new sensations when eating different dishes and tasting wines, but it also acts as one of the ways to penetrate a particular culture, an opportunity to understand the psychology of the native inhabitants and get new impressions from communication with people of another culture. Gastronomy has gone through a long historical path of development. The functioning of organizations of gastronomic tourism only contributes to its development. The most influential international organization in the field of gastronomic tourism is the World Food Travel Association. In addition, the popularization of gastronomy in tourist markets takes place thanks to the activities of UNWTO and UNESCO. It has been proven that gastronomic tourism has significant potential as a means of development of tourist destinations around the world. Forming a favourable image of the country through the prism of national cuisine is a successful marketing ploy that helps attract tourist flows. Gastronomic tourism includes various activities such as visiting producers of local products, participating in festivals, visiting markets, cooking demonstrations, tasting high-quality products, visiting restaurants or other activities related to food. Analysis of the Georgian tourism sector shows that gastronomic tourism has significant potential for the development of new quality tourist products. Various activities such as marketing and promotional tours, exhibitions, fairs, cooking courses, wine tastings, food and beverage brochures promote the country as a food tourism destination. The Georgian food and wine sector plays an important role.

Bibliography:

1. Tourism Business Frontiers: Consumers, Products and Industry / edited by Dimitrios Buhalis and Carlos Costa. 2006. P.137–147.
2. Brokaj M. The Impact of the Gastronomic Offer in Choosing Tourism Destination: The Case of Albania. *Academic Journal of Interdisciplinary Studies*. MCSER Publishing, 2014. Vol 3. No 2. P. 249–258.
3. Gheorghe G., Tudorache P., Nistoreanu P. Gastronomic tourism, a new trend for contemporary tourism? *Cactus Tourism Journal*. Vol. 9. Issue 1. 2014. P. 12–21.
4. De Jong A., Palladino M., Garrido Puig R., Romeo G., Fava N., Cafiero C., Scoglund W., Varley P., Marciano C., Laven D., Sjölander-Lindqvist A. Gastronomy tourism: an interdisciplinary literature review of research areas, disciplines, and dynamics. *Journal of Gastronomy and Tourism*. 2018. Vol. 3. P. 131–146.
5. Tovmasyan G. Exploring the role of gastronomy in tourism. *SocioEconomic Challenges*. 2019. Vol. 3. URL: <https://armgpublishing.com/wp-content/uploads/2019/10/4-1.pdf>
6. Dixit S. K., Prayag G. Gastronomic tourism experiences and experiential marketing. *Tourism Recreation Research*. 2022. Vol. 47. P. 217–220.
7. Никига О.В. Інноваційний розвиток гастрономічного туризму в регіоні (на прикладі Львівської області): дис. ... д-ра філос.: 242 "Туризм". Львів: ЛДУФК імені Івана Боберського, 2022. 213 с.
8. Підгірна В.Н., Єремія Г.І., Хникіна М.В. Аналіз тенденцій гастрономічного туризму: міжнародний досвід та Україна. *Економіка та суспільство*. 2022. Вип. 37. URL: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/1250/1205>
9. Худавердієва В. А. Гастрономічний компонент (організація харчування туристів) в аспекті мотиваційної ієрархії туризму. *Актуальні проблеми сталого розвитку*. 2024. Т. 1. № 1. С. 38–51.
10. Meladze M. Wine Tourism as a Great Opportunity for Georgia. *European Scientific Journal*. December 2016. P. 372–376.
11. Kadagidze L., Piranashvili M. Georgian gastronomic diversity to promote cultural heritage and sustainable development of tourism in the country. *European Science Review*. 2019. URL: DOI:10.29013/ESR-19-9.10-21-25
12. Gastronomic Association of Georgia. URL: <https://georgiangastronomy.ge/en/home>
13. National Statistics Office of Georgia. URL: <https://www.geostat.ge/en>
14. Борисова О. В. Спеціалізований туризм. К: Кондор, 2020. 360 с.
15. Винний та гастрономічний туризм: глобальні тренди та локальні практики: монографія / [колектив авторів] за наук ред. Д.І. Басюк. Вінниця: ПП «ТД «Едельвейс і К», 2017. 316 с.
16. Georgian National Tourism Administration. URL: <https://gnta.ge/>
17. Бондаренко А. Г., Дугієнко Н. О. Тенденції розвитку туризму в Грузії (приклад для України). *Східна Європа: економіка, бізнес та управління*. 2020. № 2(25). С. 15–20.
18. UNESCO – Decision of the Intergovernmental Committee: 8.COM 8.13, 2013. URL: <https://web.archive.org/web/20220120123643/https://ich.unesco.org/en/decisions>
19. Why Georgia, 2022. URL: <https://georgia.travel/>
20. Taste Atlas, 2022. URL: <https://www.tasteatlas.com/>
21. Tripadvisor. URL: <https://www.tripadvisor.com/>

References:

1. Hall C. M., Mitchell R. (2006). Tourism Business Frontiers: Consumers, Products and Industry / edited by Dimitrios Buhalis and Carlos Costa, pp.137–147.
2. Brokaj M. (2014). The Impact of the Gastronomic Offer in Choosing Tourism Destination: The Case of Albania. *Academic Journal of Interdisciplinary Studies MCSER Publishing*, Vol 3. No 2, pp. 249–258.
3. Gheorghe G., Tudorache P., Nistoreanu P. (2014). Gastronomic tourism, a new trend for contemporary tourism? *Cactus Tourism Journal*, Vol. 9, Issue 1, pp. 12–21.
4. De Jong A., Palladino M., Garrido Puig R., Romeo G., Fava N., Cafiero C., Scoglund W., Varley P., Marciano C., Laven D., Sjölander-Lindqvist A. (2018). Gastronomy tourism: an interdisciplinary literature review of research areas, disciplines, and dynamics. *Journal of Gastronomy and Tourism*, Vol. 3, pp. 131–146. Retrieved from: <http://miun.diva-portal.org/smash/get/diva2:1240685/FULLTEXT01.pdf>
5. Tovmasyan G. (2019). Exploring the role of gastronomy in tourism. *SocioEconomic Challenges*. Vol. 3. Retrieved from: <https://armgpublishing.com/wp-content/uploads/2019/10/4-1.pdf>
6. Dixit S. K., Prayag G. (2022). Gastronomic tourism experiences and experiential marketing. *Tourism Recreation Research*. Volume 47, pp. 217–220.
7. Nykyha O.V. (2022). Innovatsiyni rozvytok hastronomichnoho turyzmu v rehioni (na prykladi Lvivskoi oblasti) [Innovative development of gastronomic tourism in the region (on the example of Lviv region)]. (PhD thesis: 242 “Tourism”). Lviv: LDUFK imeni Ivana Boberskoho. 213 p.
8. Pidgirna V.N., Yeremiia H.I., Khnykina M.V. (2022). Analiz tendentsii hastronomichnoho turyzmu: mizhnarodnyi dosvid ta Ukraina [Analysis of gastronomic tourism trends: international experience and Ukraine].

Ekonomika ta suspilstvo. Issue. 37. Retrieved from: <https://economyandsociety.in.ua/index.php/journal/article/view/1250/1205>

9. Khudaverdiyeva V. A. (2024) Hastronomichniy komponent (orhanizatsiia kharchuvannia turystiv) v aspekti motyvatsiinoi iierarkhii turyzmu [The gastronomic component (organization of food for tourists) in the aspect of the motivation hierarchy of tourism]. *Aktualni problemy staloho rozvytku*. Volume 1. № 1. P. 38–51.

10. Meladze M. (2016). Wine Tourism as a Great Opportunity for Georgia. *European Scientific Journal*. December, pp. 372–376.

11. Kadagidze L., Piranashvili M. (2019). Georgian gastronomic diversity to promote cultural heritage and sustainable development of tourism in the country. *European Science Review*. Retrieved from: DOI:10.29013/ESR-19-9.10-21-25

12. Gastronomic Association of Georgia. Retrieved from: <https://georgiangastronomy.ge/en/home>

13. National Statistics Office of Georgia. Retrieved from: <https://www.geostat.ge/en>

14. Borysova O.V. (2020). Spetsializovanyi turyzm [Specialized tourism]. K.: Kondor, 360 p.

15. Basiuk D.I. (Ed.) et al. (2017). Vynnyi ta hastronomichniy turyzm: hlobalni trendy ta lokalni praktyky: monohrafiia [Wine and gastronomic tourism: global trends and local practices: monograph]. Vinnytsia: PP «TD «Edelweis i K», 316 p.

16. Georgian National Tourism Administration. Retrieved from: <https://gnta.ge/>

17. Bondarenko A.H., Duhiienko N.O. (2020). Tendentsii rozvytku turyzmu v Hruzii (pryklad dlia Ukrainy) [Trends of tourism development in Georgia (example for Ukraine)]. *Eastern Europe: economy, business and management*. No. 2 (25), pp. 15–20.

18. UNESCO – Decision of the Intergovernmental Committee: 8.COM 8.13 (2013) Retrieved from: <https://web.archive.org/web/20220120123643/https://ich.unesco.org/en/decisions>

19. Why Georgia (2022). Retrieved from: <https://georgia.travel/>

20. Taste Atlas (2022). Retrieved from: <https://www.tasteatlas.com/>

21. Tripadvisor (2024). Retrieved from: <https://www.tripadvisor.com/>

UDC 338:24:640:41(045)

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.18>

Kucher M. M., PhD in Economics, Associate Professor,
Department of International Tourism and Hotel
and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-3868-5311

Stebliuk N. F., PhD in Economics, Associate Professor,
Department of International Tourism and Hotel
and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-4488-769X

Haponenko S. O., PhD in Economics,
Department of International Tourism and Hotel
and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0001-6647-3335

Razinkova M. Yu., PhD in Economics, Associate Professor,
Department of International Tourism and Hotel
and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-1590-7428

Papsuy K. O., Higher Education Student,
University of Customs and Finance
ORCID: 0009-0002-4828-1406

FEATURES OF MANAGEMENT OF OPERATIONAL ACTIVITIES OF RESTAURANT ENTERPRISES

The article reveals the essence of managing the operational activities of a restaurant business enterprise. The functions of production management at the restaurant business enterprise were considered. The condition and evaluation of the operational efficiency of the restaurant enterprise was analyzed. The main indicators characterizing the production capacity of the operating system at the enterprises of the restaurant industry were established. Indicators that increase the efficiency of the use of production facilities and indicators that characterize the organizational and technical level of production are systematized. Production efficiency indicators were formed into general groups. On the basis of the research, it was found that different both foreign and domestic scientists form certain groups of indicators in their scientific research. It has been proven that operational management requires measurement indicators of such factors as: product quality; innovations; costs; speed of processes; flexibility. The main factors affecting the level of satisfaction of the needs of consumers of restaurant products are considered. The directions for improving the features and a comprehensive approach to the effectiveness of management of the operational activities of the restaurant business have been defined and substantiated. On the basis of this study, it was determined that it is appropriate to accept the profitability of the enterprise's operational activity as the largest generalizing indicator of the efficiency of the enterprise's operational activity. The essence of managing the operational activities of a restaurant is to ensure the effective functioning of all aspects of the business related to its daily activities. The main aspects of this management include: processes and operations; product and service quality; HR; financial management; risk and security management; strategic planning and business development. These aspects help to ensure efficient and stable operation of the restaurant, ensuring that customer needs are met, costs are optimized and business goals are achieved.

Key words: management efficiency, comprehensive approach, operational activity, management, restaurant business enterprise.

© M. M. Kucher, N. F. Stebliuk, S. O. Haponenko, M. Yu. Razinkova, K. O. Papsuy, 2024

Кучер М. М., Стеблюк Н. Ф., Гапоненко С. О., Разінькова М. Ю., Пансуй К. О. Особливості управління операційною діяльністю підприємства ресторанного господарства

У статті розкрито сутність управління операційною діяльністю підприємства ресторанного господарства. Розглянуто функції управління виробництвом на підприємстві ресторанного господарства. Проаналізовано стан та проведено оцінку ефективності операційної діяльності ресторанного підприємства. Встановлено основні показники, що характеризують виробничу потужність операційної системи на підприємствах ресторанного господарства. Систематизовано показники, що підвищують ефективність використання виробничих потужностей та показники, що характеризують організаційно-технічний рівень виробництва. Сформовано групи показників ефективності виробництва. Доведено, що для оперативного управління закладом ресторанного господарства необхідні показники вимірювання таких факторів, як: якість продукції; інновації; витрати; швидкість процесів; гнучкість. Розглянуто основні фактори, що впливають на рівень задоволення потреб споживачів продукції ресторанного господарства. Визначено та обґрунтовано напрямки підвищення ефективності управління операційною діяльністю підприємства ресторанного господарства. Визначено, що найбільш узагальнюючим показником ефективності операційної діяльності ресторанного підприємства доцільно вважати рентабельність його операційної діяльності. Сутність управління операційною діяльністю ресторану полягає в забезпеченні ефективного функціонування всіх аспектів бізнесу, пов'язаних з його повсякденною діяльністю. Основні аспекти такого управління включають в себе: процеси та операції; якість продукції і сервісу; управління персоналом; фінансове управління; управління ризиками та безпекою; стратегічне планування та розвиток бізнесу. Ці аспекти допомагають забезпечити ефективне та стабільне функціонування ресторану, забезпечуючи задоволення потреб клієнтів, оптимізацію витрат і досягнення бізнес-цілей.

Ключові слова: ефективність управління, комплексний підхід, операційна діяльність, менеджмент, підприємство ресторанного господарства.

Formulation of the problem. The problem of the effectiveness of management of the operational activities of restaurant enterprises is becoming increasingly acute, as customers expect better quality service with each visit to a restaurant. Restaurant operational management problems can arise for a variety of reasons, and solving them can require a comprehensive approach.

The solution to these problems usually includes analyzing current processes, improving management systems, improving the quality of personnel, optimizing costs, and developing strategies for attracting customers. It is also important to constantly monitor changes in the market and implement new technologies and management approaches.

Analysis of the latest research. The work of many scientists is devoted to the question of the operational activity of the enterprise, namely: I. Babii [2], O. Davydova [1], A. Usina [1], I. Segeda [1], S. Kravtsov [3], V. Naumchuk [5], T. Stadniuk [5], T. Petrushka [7], O. Yemelyanov [7], O. Kurylo [7] and others. However, there are not enough scientific works that consider the problems and features of operational management in the restaurant business.

The purpose of the article. The purpose of the scientific research is to justify directions for improving the features of management of the operational activities of the restaurant business through the use of various management levers.

Presenting main material. In order to ensure the effective operational activity of the enterprise, it is important to create an effective organizational and economic mechanism for its management. The organizational and economic mechanism of enterprise management is a system of methods, tools, procedures and principles used by the management to achieve the set goals, effective functioning of the enterprise and optimization of its resources. The organizational and economic mechanism aims to ensure the efficient use of the company's resources and its competitiveness on the market. Let's consider in more detail the functions of production management at a restaurant enterprise, the characteristics of which are given in table 1.

Analysis of the state and evaluation of the efficiency of the enterprise's operational activity is carried out in order to identify reserves, improve the organization of the production process, and increase the efficiency of the enterprise's operational activity.

Having conducted an analysis of literary sources on the issue of determining the indicators characterizing the operational activity of the enterprise, it was found that different authors present these indicators in different ways. Therefore, we will present our own system of indicators.

The operator's activity (main production) can be characterized with the help of the following indicators: the efficiency of the use of production capacity; organizational and technical level of production; production process; production efficiency. Indicators characterizing the production capacity of the operating system are given in table 2.

The level of utilization of the production capacity of the enterprise characterizes the measure of practical use of the production potential possessed by the enterprise [4].

The increase in the efficiency of the use of production facilities is ensured due to: improving the use of the equipment park; improvement of the use of the fund of time of operation of the equipment unit, including reduction of downtimes, reduction of time for scheduled repairs; increasing the productivity of the equipment [5; 7].

Indicators characterizing the organizational and technical level of production, namely: the production structure of the enterprise, the management structure, the level of concentration and specialization of production, the technical and energetic armament of labor, the degree of mechanization and automation, the progressiveness of technological processes are given in table 3 [8].

Table 1

Characteristics of restaurant production management functions

Function	Aim	Peculiarities
Planning	Justification of the division's production program for the year, quarter, etc.; Calculation of the need for personnel; Justification of expenses	Variety of planning areas: product production planning; planning of the activities of divisions; product sales planning; operational calendar planning; resource planning; product renewal planning [11]
Organisation	The main goal is to provide production with all the necessary materials and the following continuous observation of the movement in the course of their production.	At the inter-shop level, the organization of shop work is reduced to: provision of workshops with appropriate technological documentation; provision of workshops with raw materials, materials, semi-finished products; ensuring timely repair of equipment in accordance with the schedule of planned and preventive repairs, inter-shop maintenance, etc.
Control points	Detection of deviations from established norms	Fulfillment of production control requirements.
Regulation of production	Implementation of the process of development and implementation of solutions	Implementation of the operational regulation process

Source: [1; 3]

Table 2

Indicators characterizing production capacity

Indicator	Formula	Marking
Practical production capacity, natural unit per hour	$M_n = q_\phi \cdot N \cdot T_m^\phi$	q_ϕ – maximal real productivity of equipment, natural unit per hour N – the number of devices working in parallel in one technological line, pcs T_m^ϕ – actual use of the time fund of working equipment, time
Economic production capacity, natural unit per hour	$M_s = q_\phi \cdot N \cdot T_m$	T_m – annual equipment operating time fund, time
Hourly productivity of the equipment, natural unit per hour	$q = \frac{Q \cdot C_u}{t_u \cdot 100}$	Q – raw materials used, natural unit per hour C_u – the degree of use of the substance contained in the raw material, %; t_u – duration of the technological cycle, hours.
The total production capacity of the enterprise, in monetary terms, million UAH	$M_c = \sum_{j=1}^m M^j \cdot \Pi$	M^j – economic production capacity of the enterprise for one type of product, natural unit Π – the enterprise's wholesale price per unit of the j th type of product, UAH/natural unit
The level of utilization of the production capacity of the enterprise, %	$K_M = \frac{Q_\phi}{M_s} \cdot 100\%$	Q_ϕ – the actual volume of product production, natural unit
The level of use of the hourly productivity of the equipment, %	$K_n = \frac{q_\phi}{q_n} \cdot 100\%$	q_n, q_ϕ – the passport hourly productivity of the equipment has actually been achieved, natural unit per hour
The degree of utilization of the maximum possible equipment operating time fund, %	$K_t = \frac{T_\phi}{T_s} \cdot 100\%$	T_ϕ – the actual operating time of the equipment for the year, hours T_s – equipment operating time fund included in the calculation, hours
The degree of use of the set number of units, %	$K_k = \frac{N_{cp}}{N} \cdot 100\%$	N_{cp} – average annual actual number of units, units N – the number of units included in the production capacity calculation, units

Sources: created by author [1; 8]

Table 3

Indicators characterizing the organizational and technical level of production

Indicator	Formula	Marking
Labor capital, UAH/person	$\Phi_{O3} = \frac{C_{o.\phi}}{Ч}$	$C_{o.\phi}$ – average annual cost of fixed assets, UAH Ч – average number of staff, people
Electrical equipment of labor, kWh / person	$E_n = \frac{E}{F_{\text{факт}}}$	E – the amount of energy consumed during the year, kWh / year; $F_{\text{факт}}$ – actual worked time per year, person-hours / year
The specific weight of the active part in the total cost of the fixed assets, %	$\alpha_{a.n.\phi} = \frac{C_{a.o.\phi}}{C_{o.\phi}}$	$C_{a.o.\phi}$ – active part of fixed assets, UAH
The fate of specialized production, %	$d_{cn} = \frac{B_c}{B_o} \cdot 100\%$	B_c – production volume, UAH; B_o – total volume of production, UAH
Coefficient of cooperation	$K_{\text{кооп}} = \frac{B_{\text{нок}}}{3B_{\text{моє}}}$	$B_{\text{нок}}$ – the cost of purchased semi-finished products, UAH; $3B_{\text{моє}}$ – total production costs, UAH
Coefficient of rationality of moving objects of work	$K_{n.n} = \frac{Q_n}{Q_3}$	Q_n – volume of work on flow lines, man-hours; Q_3 – total volume of work, man-hours
The degree of use of production equipment	$K_{e.y} = \frac{\sum_1^n Q_{\phi} \cdot T_{\phi}}{\sum_1^n Q_n \cdot T_n}$	Q_n, Q_{ϕ} – passport (design), actual equipment productivity, pcs/hour T_{ϕ} – actual time of robot equipment, hours; T_n – nominal operating fund of the equipment, h.

Source: [8]

Measuring the operational efficiency of restaurant enterprises is calculated using indicators. The analysis of domestic and foreign scientific studies showed that it is best to form all indicators of the enterprise into certain groups [6; 9]. Also, one of the indicators characterizing the efficiency of operational activity is the profitability of production (table 4).

Table 4

Production efficiency indicators

Indicator	Formula	Marking
Fund return, UAH/UAH	$\Phi_{\text{г}} = \frac{B\Pi}{O\Phi_{\text{cep}}}$	BП – gross output, UAH; OФ _{cep} – average annual cost of fixed assets, UAH
Capital capacity, UAH/UAH	$\Phi_{\text{м}} = \frac{1}{\Phi_{\text{г}}} = \frac{O\Phi_{\text{cep}}}{B\Pi}$	$\Phi_{\text{г}}$ – fund return, UAH / UAH
Labor productivity, UAH/person	$\Pi\Pi\Pi = \frac{B\Pi}{Ч}$	Ч – average number of employees, persons
Material capacity, UAH/UAH	$M_{\text{м}} = \frac{MБ}{B\Pi}$	MБ – direct material costs, UAH
Profitability of production, %	$P_{\text{г}} = \frac{\Pi_p}{B_{\text{вир}} + B_p}$	Пр – profit from sales, UAH; Ввир – production costs, UAH; Bp – costs for the sale of products, UAH;
Total profitability, %	$P_3 = \frac{\Pi}{O\Phi_{\text{cep}} + OK_{\text{cep}}}$	П – amount of profit, UAH; OK _{cep} – average annual balances of working capital, UAH

Sources: [1; 2]

Measures of operational effectiveness and efficiency are often indicators of ultimate success or failure, but do not provide clear guidance to management about what to do if unplanned changes occur. Non-financial indicators of effective activity are necessary for operational management of the enterprise at the level of lower and middle managers. At the highest level of the company's management, more attention should be paid to financial performance indicators, which are criteria for the final results of the company's work. For operational management,

indicators of measurement of such factors as: product quality are necessary; innovations; costs; speed of processes; flexibility[10].

All these factors affect the level of satisfaction of the needs of consumers of restaurant products and determine the competitiveness, and therefore the survival of the enterprise on the market. Of course, all these indicators must be achieved under the condition of obtaining a sufficient level of profit or at least covering costs, depending on the strategic objectives of the enterprise, which determines the purpose of the enterprise's activities. Therefore, the company should systematically and regularly collect information on direct and indirect indicators of the degree of consumer satisfaction.

The factors listed above affect the degree of satisfaction of the needs of the service sector. All of them are interconnected and can be measured by the following indicators: product quality – the number of complaints in relation to the volume of product sales; innovations – the number of new products over a period of time; the speed of processes – the time that passes from placing an order to its execution; flexibility – by the number of types of products that use the same nodes and parts for their production.

This, of course, is not a complete list of indicators. They will differ in different enterprises. However, they should provide an adequate assessment of effectiveness. These figures should be considered in comparison with the figures of past periods or with the best figures in the industry, if such information is available. The use of non-financial indicators of the company's effective activity shifts the emphasis to business processes and determines the search for better work methods.

Consideration of all the above indicators makes it possible to identify the main components of the formulas that are most often used in the calculation of various indicators characterizing the efficiency of the company's operational activities for various market subjects. Most of them are one way or another related to the profit of the enterprise (total amount, profit from product sales, net profit).

Conclusions. Management of operational activities includes planning and coordination of the use of enterprise resources in the process of transforming them into the final product, comprehensive control and regulation of the production process. To achieve competitiveness, it is necessary to use production management tools and methods to ensure its efficiency. During the analysis of the research, the indicators characterizing the management of the company's operational activities were comprehensively considered. In the course of the research, indicators characterizing the management of the company's operational activities were comprehensively considered, namely indicators of production capacity, production process, organizational and technical level, production efficiency and general economic indicators. To ensure the effectiveness of the organizational and economic mechanism of effective operational activity of the enterprise, it is necessary to implement a controlling system. To assess the efficiency of the enterprise, it is necessary to use a system of indicators, which can be used to make such an assessment.

Bibliography:

1. Давидова О.Ю., Усіна А.І., Сегеда І.В. Ресторанний менеджмент : підручник. Харк. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. Х. : ХНУМГ, 2014. 279 с.
2. Капінос Г.І., Бабій І.В. Операційний менеджмент : навч. посіб. К. : «Центр учбової літератури», 2013. 352 с.
3. Кравцов С.С. Система операційного менеджменту ресторану: структура та вимоги до розробки. *Ефективна економіка*. 2018. № 6. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/6_2018/60.pdf
4. Маховка В.М., Шаренко Ю.О., Тузніченко О.Ю. Особливості управління підприємствами ресторанного господарства. *Науковий вісник Міжнародного гуманітарного університету*. URL: <http://vestnik-econom.mgu.od.ua/journal/2018/34-2018/6.pdf>
5. Наумчук А.В., Стаднюк Т.В. Стратегічний аналіз в системі управління операційною діяльністю підприємства. *Глобальні та національні проблеми економіки*. Вип. 6. 2015. URL: <http://global-national.in.ua/archive/6-2015/177.pdf>
6. Пенська І.О. Організація планування операційної діяльності на підприємствах. *Ефективна економіка*. 2021. № 5. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/5_2021/102.pdf
7. Петрушка Т.О., Ємельянов О.Ю., Курило О.Б. Підвищення ефективності господарської діяльності як чинник економічного розвитку підприємств. *Ефективна економіка*. 2020. № 12. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/12_2020/73.pdf
8. Саричев Д.О. Управління ефективністю операційної діяльності підприємства. *Стратегія економічного розвитку України* : зб. наук. пр. 2012. № 30. С. 136–144.
9. Стамат В.М. Сучасні тенденції менеджменту ресторанного бізнесу. *Modern Economics*. № 36. 2022. С. 130–136. URL: <https://modecon.mnau.edu.ua/issue/36-2022/stamat.pdf>
10. Тульчинська С.О., Погребняк А.Ю., Крашевська Т.О. Детермінанти ефективності операційної діяльності підприємства. *Економічний вісник НТУУ «Київський політехнічний інститут»*. № 26. 2023. С. 90–95.

References:

1. Davydova O.Iu., Usina A.I., Sehedra I.V. (2014). Restorannyyi menedzhment : pidruchnyk [Restaurant management: a textbook]. Kharkiv National University of Urban Economy named after O.M. Beketova. Kh.: XNUMG, 279 p.
2. Kapinos H.I., Babii I.V. (2013). Operatsiinyi menedzhment : navch. posib. [Operational management: training. manual]. K.: «Center for Educational Literature», 352 p.
3. Kravtsov S.S. (2018). Restaurant operational management system: structure and development requirements. Efficient economy, No. 6. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/6_2018/60.pdf
4. Makhovka V.M., Sharenko Yu.O., Tuznichenko O.Iu. Peculiarities of restaurant management. Scientific Bulletin of the International Humanitarian University. URL: <http://vestnik-econom.mgu.od.ua/journal/2018/34-2018/6.pdf>
5. Naumchuk A.V., Stadniuk T.V. (2015). Strategic analysis in the management system of the enterprise's operational activities. Global and national economic problems. Issue 6. URL: <http://global-national.in.ua/archive/6-2015/177.pdf>
6. Pienska I.O. (2021). Organization of planning of operational activities at enterprises. Efficient economy, no. 5. http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/5_2021/102.pdf
7. Petrushka T.O., Yemelyanov O.Yu., Kurylo O.B. (2020) Increasing the efficiency of economic activity as a factor in the economic development of enterprises. Efficient economy, no. 12. URL: http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/12_2020/73.pdf
8. Sarychev D.O. (2012) Management of the efficiency of the company's operational activities. Strategy of the economic development of Ukraine: coll. of science pr., no. 30, pp. 136–144.
9. Stamat V.M. (2022). Modern trends in restaurant business management. Modern Economics, no. 36, pp. 130–136. URL: <https://modecon.mnau.edu.ua/issue/36-2022/stamat.pdf>
10. Tulchynska S.O., Pohrebniak A.Iu., Krashevskaya T.O. (2023). Determinanty efektyvnosti operatsiinoi diialnosti pidpriemstva [Determinants of the efficiency of the enterprise's operational activity]. Economic bulletin of NTUU «Kyiv Polytechnic Institute», no.26, pp.90–95.

UDC 338.48

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.19>

Horozhankina N. A., PhD in Geography, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of International Tourism
and Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000–0003–2773–8630

Korneyev M. V., Doctor of Economics, Professor,
Dean of the Faculty of Innovative Technologies
University of Customs and Finance
ORCID: 0000–0002–4005–5335

Horb K. M., PhD in Geography, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of International Tourism
and Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000–0002–3779–484X

Tretyak Ye. S., Higher Education Student,
University of Customs and Finance
ORCID: 0009–0003–9965–7060

HOSTELLING AT GLOBAL AND NATIONAL LEVELS

The current state of the global hostel market is characterized. It has been established that the global hostel market reached USD 4.1 billion in 2022. The leader in the hostel market is the Asia–Pacific region, which is experiencing active recovery in international tourism following the COVID–19 pandemic. The European region ranks second, followed by the Americas. It has been determined that the largest share of hostel guests consists of individuals aged 25 to 34. The TOP–5 hostel networks in the world as of 2022 were: a&o Hostels, Zotel, Meininger, St Christopher's Inns, and Nomads World.

The current state of hostelling in Ukraine is analyzed. It has been established that at the present stage, under the conditions of Russian aggression in Ukraine, official statistics do not reflect the actual number of hostel establishments. The review of the hostel base was conducted based on online booking websites. Hotelmix offers guests hostels in 20 cities of Ukraine, totaling 272 hostels. The largest number of hostels is located in Kyiv (39.3% of the total number of available hostels), followed by Lviv (20%) and Odesa in third place (7.4%). Booking.com offers guests 275 hostels in various regions of Ukraine. It was found that not all hostels are listed on official online booking platforms.

A SWOT–analysis of hostel businesses was conducted. Positive changes in the hostel market require joint actions from government bodies and hostel operators. Combined efforts from both sides will ensure measures at the national level to improve hostel operations and advance the hostel industry to a new stage of development, while simultaneously preventing the influence of negative factors arising from the weaknesses in hostel operations (lack of service quality standards, the mass emergence of economy–class hotels in the market, insufficient information on hostel services, lack of legislative regulation for hostel operations) and threats (oversaturation of the market with hostel services, travelers' changing preferences toward more comfortable accommodations, the growth of the 2–3 star hotel segment, which offers an alternative to hostels, lack of government support, and a decrease in investment flows).

Key words: hostelling, hostel, hostel network, world regions, Ukraine.

Горожанкіна Н. А., Корнеєв М. В., Горб К. М., Третяк Є. С. Хостелінг на світовому та національному рівнях
Охарактеризовано сучасний стан світового ринку хостелінгу. Лідером на ринку хостелінгу є Азійсько–Тихоокеанський регіон, в якому відбувається активне відновлення міжнародного туризму після пандемії COVID–19, друге місце посів Європейський регіон, третє – Американський. Встановлено, що найбільша частка гостей хостелів – це люди у віці від 25 до 34 років. Розглянуто ТОП–5 мереж хостелів у світі станом на 2022 рік: a&o Hostels, Zotel, Meininger, St Christopher's Inns, Nomads World.

Проаналізовано сучасний стан хостелінгу в Україні. Встановлено, що на сучасному етапі в умовах російської агресії в Україні офіційна статистика не відображає реальну кількість закладів хостельного господарства. Розгляд

хостельної бази здійснювався на основі сайтів онлайн-бронювання. *Hotelmix* пропонує гостям 20 міст України із 272 хостелами. Найбільша кількість хостелів припадає на м. Київ (39,3% від всієї кількості запропонованих хостелів), друге місце посідає м. Львів (20%), на третьому місці м. Одеса (7,4%). *Booking.com* пропонує гостям 275 хостелів в різних регіонах України. Встановлено, що не всі хостели представлені на офіційних сайтах онлайн-бронювання.

Проведено SWOT-аналіз діяльності хостельних підприємств. Позитивні зміни на ринку хостелів потребують спільних дій органів державної влади та хостелів. Спільні зусилля обох сторін забезпечать вжиття заходів на національному рівні для покращення діяльності хостелів та виведення хостельного господарства на новий етап розвитку, водночас запобігаючи впливу негативних факторів, що виникають через слабкі сторони функціонування хостелів (відсутність стандартів якості послуг, масова поява на ринку готелів економ-класу, відсутність у необхідній кількості інформації про послуги хостелів, відсутність законодавчого регулювання діяльності хостелів тощо) і загрози (зміна інтересів мандрівників до більш комфортального проживання, збільшення сегменту готелів 2–3 зірки, які є альтернативою хостелам, відсутність державної підтримки, зниження потоку інвестицій тощо).

Ключові слова: хостелінг, хостел, хостельна мережа, регіони світу, Україна.

Problem Statement. Modern tourist accommodation is characterized by a wide range of options, from large luxury hotels to small budget hotels. The growing popularity of independent travel has increased both the demand for and supply of small, budget-friendly accommodations in the hospitality market. This category of accommodation includes hostels, which are characterized by relatively low accommodation costs and the provision of basic services necessary for comfortable lodging and service.

The hostel market is a driving force in the global travel and hospitality industry. It offers budget-conscious travelers affordable yet social and engaging accommodation options, appealing to a wide range of tourists, from solo travelers to groups and families.

Hostels have become an essential part of the global tourism landscape, facilitating exploration and cultural exchange. This expansion has contributed to economic growth in various regions of the world, the creation of new jobs in the hospitality industry, and the development of small businesses.

Moreover, the development of digital platforms has made hostel bookings more accessible, further promoting the growth of international tourism. With an increased focus on sustainability and unique experiences, hostels continue to play a key role in shaping the global tourism market.

Analysis of Recent Research and Publications. The theoretical and methodological foundation of the research was based on the works of Ukrainian scholars, including I. Poplavska (Territorial Organization of Hotel Industry in Ukraine [20]), M. Aldoshina (Hostels as Collective Accommodation Facilities in Ukraine [12]), Y. Bondarenko, I. Kulyniak (Evaluation of Collective Accommodation Activities as a Recreation Sector Organization [14]), I. Stankevych, T. Sukhoruchenko (Functioning and Development Problems of Enterprises in the Hotel Business Sphere in Ukraine under Real-Time Information Conditions [10]), S. Pambuk, I. Ustenko, M. Mardar (Marketing Justification, Organizational and Economic Characteristics of Small Businesses in the Provision of Hotel Services [8]). The study of the spatial distribution of hostel establishments in European countries was based on official statistical data from the Hostel Market 2023 report [3], while the study of hostel operations in Ukraine was based on data from online booking platforms [5,18,19].

Purpose of the Article: to investigate the functioning of hostelling in global and national markets.

Presentation of the Main Material. Modern accommodation facilities are characterized by significant differentiation, ranging from large high-end hotels to small budget hotels. The growing popularity of self-planned travel has increased both the demand for and supply of small, budget-friendly accommodations in the hospitality market. These accommodations include hostels, which are distinguished by their relatively low cost and the provision of basic services necessary for comfortable lodging and service.

The term "hostel" refers to a European accommodation system that offers guests short- or long-term stays, typically providing a bed without additional in-room amenities [13].

According to the international classification of the UNWTO, hostels are classified as collective accommodation facilities and offer limited hotel services, excluding daily bed-making [16].

The global hostel market reached USD 4.1 billion in 2022, and it is expected to grow to USD 8.9 billion by 2030, with a GDP growth rate of 10.2% during the period 2023–2030 [3].

The Asia-Pacific region leads the hostel market, experiencing a rapid recovery in international tourism after the COVID-19 pandemic (54% of the pre-pandemic level as of 2023). The European region ranks second, followed by the Americas.

It can be noted that the largest share of hostel guests consists of individuals aged 25 to 34. This distribution is related to the popularity of hostels among a group known as "flashpackers" or "backpackers," who prefer the social atmosphere and amenities provided by hostels.

In European countries such as Germany, the UK, and France, hostels are predominantly concentrated in cities and cater mainly to youth and student tourism. In Spain and Italy, hostels are increasingly expanding throughout the country. The price per bed per night in major European countries ranges from 600 to 2000 UAH. The highest prices for hostel accommodation are in the UK, which can be explained by the high cost of living in this country, including accommodation services.

Let us take a closer look at the TOP–5 hostel chains in the world (Fig. 1):

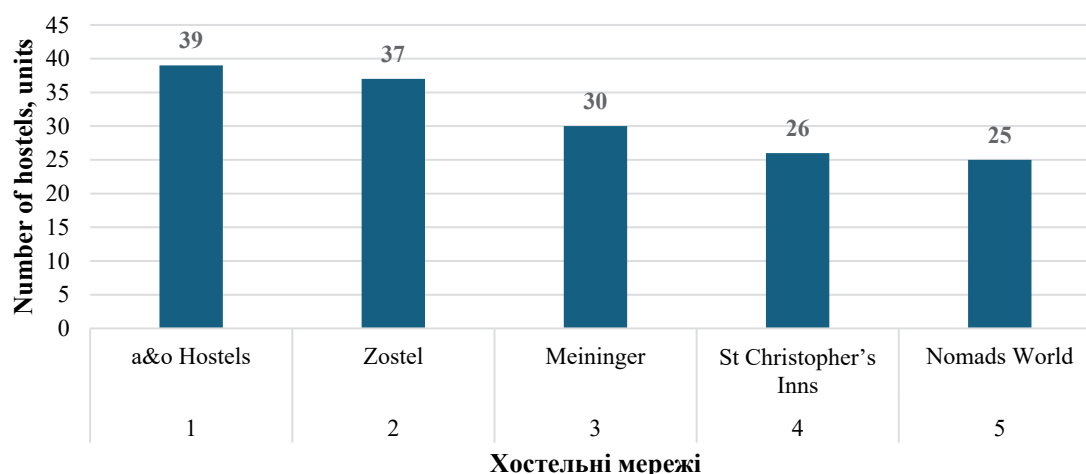


Figure 1. TOP–5 largest hostel networks in the world as of 2022

Source: compiled by the authors based on [2–4]

– The first place in terms of the number of hostels is held by the a&o Hostels chain, which operates 39 hostels with a total of 28,500 beds. The distribution across European countries is as follows: Germany (27), Austria (3), Denmark (2), Czech Republic (2), Italy (2), Hungary (1), Netherlands (1), Poland (1). The a&o Hostels chain was founded by Oliver Winter in 2000. The hostels are distinguished by offering modern, almost hotel–like amenities in central locations while maintaining affordable prices [1].

– The second place is occupied by the Zostel network, with 37 hostels and 2,000 beds. The region of operation is Asia, with 35 hostels in India and 2 in Nepal. Zostel was founded in 2013 and quickly became the largest hostel network in India and Asia. Almost all Zostels operate as a franchise model, which explains their rapid growth [11].

– Third place is occupied by the Meininger network, with 30 hostels and 14,700 beds. The network operates mainly in the European region: Germany (13), Austria (4), Italy (3), Netherlands (2), Belgium (2), France (4), Hungary (1), and Copenhagen (1). The hostel that operated in Russia ceased to exist [6]. Meininger, founded in 1999, brands itself as a "hybrid hotel," offering affordable accommodations with amenities similar to those of hotels. Its hostels stand out for their high–quality furnishings and modern rooms.

– Fourth place belongs to St Christopher's Inns, with 26 hostels and approximately 3,700 beds. The network operates in the European region: the United Kingdom (13), Germany (3), Netherlands (3), France (2), Switzerland (1), Spain (1), Belgium (1), Denmark (1), and Czech Republic (1). St Christopher's Inns is managed by a young and dynamic team [9].

– Fifth place goes to Nomads World, with 25 hostels, though the total number of beds is not specified. The hostels are located in the Australia and Oceania region: Australia (15) and New Zealand (10). Nomads World was founded by Richard McLeod in 1994 and is now the largest hostel network in the region. In 2015, Nomads World acquired the second–largest hostel network in Oceania ("Base"), which now operates under the Nomads brand [7].

It is worth noting that the COVID–19 pandemic had a significant impact on the hostelling market. Travel restrictions, quarantine measures, and safety concerns led to a sharp decline in both international and domestic tourism, causing many hostels to temporarily close or operate at reduced capacity. This resulted in substantial revenue losses, layoffs, and financial instability for many hostel businesses.

Russia's full–scale invasion of Ukraine has also significantly impacted the hostel market, primarily due to its effect on international tourism metrics. Military actions have caused disruptions in travel across Eastern Europe. Destinations such as Moldova, Slovenia, Latvia, and Finland have experienced substantial drops in flight activity, with some countries seeing decreases as high as 69% compared to 2019 levels.

Now, let's turn to the national hostel market. One of the key directions of Ukraine's domestic policy during the war is the development of domestic tourism in safer areas of the country. This can be considered an important source of economic activity, contributing to the financial and economic development of cities and regions, mobilizing human capital, revitalizing the service sector, and fostering the formation of modern cultural and humanitarian infrastructure [21].

Ukrainian cities and regions, with their rich historical, architectural, cultural, and natural potential, have significant preconditions for developing this industry as a major source of revenue and budget replenishment. At the same time, there is a need to increase the number of children and adolescents traveling within Ukraine, especially from the eastern regions, which are closer to the conflict zone.

A key measure for the development of domestic tourism is the organization of a network of budget accommodation facilities, providing affordable lodging for youth, schoolchildren, and tourists during excursions to tourist and recreational destinations across Ukraine. Based on international experience and objective needs, it is advisable to refer to the best foreign practices in managing popular and relatively inexpensive accommodation facilities for travelers (youth hostels).

The most common and popular rooms accommodate 4, 8, or 10 people. Hostel accommodation is intended for less demanding travelers. The primary customer of this type of accommodation is the independent traveler, who embarks on a trip to another country or region of the country without purchasing a prearranged tour from a travel company.

Official statistical information does not provide the total number of hostels operating in Ukraine at this stage of the war. Therefore, we will examine the hostel base using data from online booking platforms.

On the website Hotelmix [5], the "Hostels of Ukraine" section provides a list of these accommodation facilities across cities in the country, though it should be noted that this list is not comprehensive. It reflects the most popular hostels that have positive reviews from visitors.

Hotelmix offers guests a choice of 272 hostels in 20 cities across Ukraine. The largest number of hostels is located in Kyiv (39.3% of all available hostels), followed by Lviv (20%) and Odesa (7.4%). This top three confirms the fact that in large cities with developed tourism potential, the availability of alternative accommodations to hotels at affordable prices is essential. Dnipro ranks sixth in terms of the number of hostels (4.4% of all listed hostels) on the site.

The lowest price for a night's stay in a hostel is 157 UAH at Hostel Darnitsa (Kyiv, the hostel consists of 129 rooms and is located 7 km from the Kyiv Pechersk Lavra and 8 km from the St. Michael's Vidubichi Men's Monastery). The average cost of accommodation in hostels across Ukraine is approximately 300 UAH in a mixed dormitory room.

Booking.com [18] offers guests 275 hostels in various regions of Ukraine. This figure is close to the data presented by Hotelmix. The Kyiv region ranks first, followed by the Lviv region, with the Odesa and Dnipropetrovsk regions sharing third place.

On the Hotels-of-Ukraine website [19], there is information on 983 hostels in Ukraine, indicating a much broader base of accommodation options listed on the site. Thus, it can be noted that, unfortunately, not all hostels are represented on official online booking platforms.

A review of hostels in Dnipro based on data from [19] shows information about 24 such accommodation facilities, mostly concentrated on the right bank of the city near the train station and central areas, highlighting the importance of transport accessibility to hostels.

The average price for a night's stay in a hostel is around 300 UAH. Most hostels in the city offer accommodation in rooms with 4, 8, or 10 beds. Meal services are not included and are not provided.

It can be noted that each hostel is unique and original. On the Internet, prices may range from 150 to 700 UAH to attract attention, but the actual average price category is around 250 UAH in Dnipro. A problem is the lack of information about hostels across different online booking platforms.

The hostel market is highly in demand in the frontline city, primarily due to the necessity for temporary relocation of residents from eastern regions, who require budget accommodation near transport hubs.

Hostels are an integral part of the country's tourism industry, helping to develop the hotel market and serving as a cost-effective option for budget-conscious tourists and city visitors.

The creation of hostels in Ukraine addresses problems that existing traditional hotel companies are unable to solve, such as providing housing for various social groups, establishing a base of budget accommodations, increasing domestic travel, employing local populations, and fostering the development of small and medium-sized businesses in the country.

Ukraine has its own challenges and prospects for hostel development, which will be discussed below.

A significant obstacle to hostel market development today is the ongoing war in the country, political instability, and difficulties in the banking sector. Hostel owners are hesitant to invest in improving the material and technical base of accommodations, enhancing service quality, and registering on various online booking platforms.

Key issues include the lack of high-quality offerings, the need to restore the hotel stock, low service levels, a shortage of qualified personnel, and the absence of themed hostels. If we look at hostels in economically developed countries, they resemble small hotels with their own themes, design, and history.

Another issue is the high price levels. Sometimes, the cost of staying in a Ukrainian hostel is much higher than in a similar hostel in a European country, which can be explained by the shortage of hostels in the market. A cheap hostel in Ukraine is more likely to resemble an old storage room rather than a comfortable place for overnight stays, while a hostel meeting European standards will have a price comparable to a comfortable hotel room.

The further development of hostels as a sector of hotel services creates conditions for applying internal and social factors in other industries:

1. High economic efficiency of hostels. The technical management process of hostels and guest services offers affordable services because accommodation services are highly competitive compared to the more expensive

services of traditional hotels. Modern hostels have transformed from simple overnight accommodations into facilities offering a range of additional services. This allows the hostel to differentiate its products for different consumer segments (family travelers, youth, business travelers). Although this list of additional services is limited, it enables low-income travelers to access affordable accommodations.

2. High competitiveness of hostel services in terms of price-quality ratio, flexibility of structure, and the ability to quickly respond to changes in supply and demand.

3. Hostel operations allow offering competitive prices to consumers. Hostel accommodation costs are lower than those of budget hotels, and hostels have a more flexible market structure that can quickly adapt to market conditions and change pricing strategies accordingly.

4. Hostels meet the accommodation needs of a wide range of people, mostly young individuals and those with middle incomes, ensuring high occupancy rates in accommodation facilities [21].

With careful analysis of drawbacks and implementation of measures at the state level, hostels can become as popular as hotels. This can be achieved by: low competition in the hostel market and high demand for accommodation facilities, as most hostel guests are business travelers, students, and budget-conscious tourists who require basic lodging for a short stay; after Ukraine's victory in the war with Russia, a new large wave of tourists is expected, the majority of whom will be young people from various countries around the world; the third advantage is related to modern travelers' preference for a complete sense of comfort, uniqueness, and originality in accommodation. Hostels' competitive advantages include personalized guest service, the exclusive opportunity to stay in a diverse environment with foreigners and interact with them, and a relatively quick return on investment (3–5 years) [17].

To ensure the active functioning of the hostel market in Ukraine's regions, close interaction between government bodies and hostel owners is needed. This collaboration will not only implement measures to improve hostel operations at the national level and elevate them to a new level of functioning but also protect hostels from negative factors caused by the weaknesses in hostel operations and threats identified through the SWOT analysis (Table 1).

Table 1

Strengths and Weaknesses of Hostel Enterprises

Strengths	Weaknesses
Increase in tourist numbers Rising popularity of hostel stays Growth in the number of hostels with below-average pricing Central location Individual approach to guests Consistently high occupancy rates	Lack of service quality standards Mass emergence of budget hotels on the market Insufficient information about hostel services Lack of legislative regulation for hostel operations
Opportunities	Threats
Expansion of the small accommodation market Obtaining international quality certifications	Oversaturation of the market with hostel services Shift in traveler preferences toward more comfortable accommodations Growth of the 2–3 star hotel segment, which serves as an alternative to hostels Lack of government support Decline in investment flow

Source: compiled by the authors

Conclusions and Future Research Prospects. Drawing on global experience in the development and functioning of hostelling, effective collaboration between the private and public sectors in Ukraine's hostelling market development should include: the development of regulatory documents governing hostel operations in Ukraine; the establishment of a functional association/union that assists hostels in promoting services, provides consultancy support, and participates in drafting legislative documents for hostel operations; cooperation with government bodies in gathering and analyzing data on hostel operations, identifying promising directions for the country's tourism and recreation policies, and using this data to shape long-term tourism development strategies.

Bibliography:

1. A&O Hostels. URL: <https://www.aohostels.com/en/>
2. Global Hostel Market – 2023–2030. URL: <https://www.giiresearch.com/report/dmin1390163-global-hostel-market.html>
3. Hostel Market 2023 (New Report): Global Research Strategic Analysis 2031. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/hostel-market-2023-new-report-global-7bc0f>
4. Hostels Market. URL: <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/hostels-market>
5. Hotelmix: Хостели України. URL: <https://hotelmix.com.ua/hostels/ukraine>
6. Meininger. URL: <https://www.meininger-hotels.com/en/backpacker-hotels/>
7. Nomads World. URL: <https://nomadsworld.com/>

-
8. Pambuk S., Ustenko I., Mardar M. Marketing substantiation, organizational and economic characteristics of small business in the provision of hotel services. *Фінансово-кредитна діяльність: проблеми теорії та практики : зб. наук. пр.* 2021. Вип. 4. С. 439–450.
 9. St Christopher's Inns. URL: <https://www.st-christophers.co.uk/hostels>
 10. Stankevych I. V., Sukhoruchenko T. S. Functioning and development problems of the enterprises in the sphere of hotel business in Ukraine in the conditions of real-time information. Проблеми функціонування та розвитку підприємств сфери готельного бізнесу України в умовах інформаційного сьогодення. *Наук. пр. ОНАЗ ім. О. С. Попова.* 2019. № 1. С. 176–185.
 11. Zostel. URL: <https://www.zostel.com/>
 12. Алдошина М.В., Бондаренко Н.А. Хостели як колективні засоби розміщення в Україні. *Економіка і суспільство.* Вип 3. 2017. URL: https://economyandsociety.in.ua/journals/13_ukr/54.pdf
 13. Байлик С. І., Писаревський І.М. Організація готельного господарства : підручник. Харків : ХНУМГ ім. Бекетова, 2015. 329 с.
 14. Бондаренко Ю. Г., Кулиняк І.Я. Оцінювання діяльності колективних засобів розміщення як організації рекреаційної сфери. *Вісник Національного університету «Львівська Політехніка».* 2018. № 897. С. 3–15.
 15. ДСТУ 9106:2021 Туристичні послуги. Хостели. Загальні вимоги та класифікація. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=95566
 16. Мальська М.П., Пандяк І.Г. Готельний бізнес: теорія та практика : Навчальний посібник. К: Центр учбової літератури, 2009. 472 с.
 17. Миколюк О.А., Прилепа Н.В. Формування системи управління якістю підприємств готельного бізнесу. *Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки.* 2015. № 2(2). С. 309–312.
 18. Офіційний сайт онлайн-бронювання Booking.com. URL: <https://www.booking.com>
 19. Офіційний сайт онлайн-бронювання hotels-of-ukraine. URL: <https://www.hotels-of-ukraine.com/en/>
 20. Поплавська І.В. Територіальна організація готельного господарства України : автореф. дис. ... канд. геогр. наук : 11.00.02. Київ. нац. ун-т ім. Т. Шевченка. К., 2011. 20 с.
 21. Тімар І.В. Вплив іміджу підприємства сфери готельних послуг на формування його конкурентних переваг. *Вісник Дніпропетровського університету. Серія : Економіка.* 2015. Т. 23, Вип. 9(3). С. 145–149.

References:

1. A&O Hostels (2024). Retrieved from: <https://www.aohostels.com/en/>
2. Global Hostel Market – 2023–2030. (2024). Retrieved from: <https://www.giiresearch.com/report/dmin1390163-global-hostel-market.html>
3. Hostel Market 2023 (New Report): Global Research Strategic Analysis 2031 (2024). Retrieved from: <https://www.linkedin.com/pulse/hostel-market-2023-new-report-global-7bcof>
4. Hostels Market (2024). Retrieved from: <https://www.marketdataforecast.com/market-reports/hostels-market>
5. Hotelmix: Hostels of Ukraine (2024). Retrieved from: <https://hotelmix.com.ua/hostels/ukraine>
6. Meininger (2024). Retrieved from: <https://www.meininger-hotels.com/en/backpacker-hotels/>
7. Nomads World (2024). Retrieved from: <https://nomadsworld.com/>
8. Pambuk, S., Ustenko, I., Mardar, M. (2021). Marketing substantiation, organizational and economic characteristics of small business in the provision of hotel services. Financial and credit activity problems of theory and practice 4(39), 439–450. DOI:10.18371/fcaptp.v4i39.241412
9. St Christopher's Inns (2024). Retrieved from: <https://www.st-christophers.co.uk/hostels>
10. Stankevych, I. V., Sukhoruchenko, T. S. (2019). Functioning and development problems of the enterprises in the sphere of hotel business in Ukraine in the conditions of real-time information. *Nauk. pr. ONAZ im. O. S. Popova*, 1, 176–185.
11. Zostel (2024). Retrieved from: <https://www.zostel.com/>
12. Aldoshyna, M. V., Bondarenko, N. A. (2017). Khostely yak kolektyvni zasoby rozmishchennia v Ukraini [Hostels as collective means of accommodation in Ukraine]. *Ekonomika i suspilstvo. Vyp 3.* Retrieved from: https://economyandsociety.in.ua/journals/13_ukr/54.pdf
13. Bailyk, S. I., Pysarevskiy, I. M. (2015). Orhanizatsiia hotelnoho hospodarstva [Organization of the hotel industry]. Kharkiv : KhNUMH im. Beketova, 329 p.
14. Bondarenko, Yu. H., Kulyniak, I. Ia. (2018). Otsiniuvannia diialnosti kolektyvnykh zasobiv rozmishchennia yak orhanizatsii rekreatsiinoi sfery [Evaluation of the activity of collective means of accommodation as an organization of the recreational sphere]. *Visn. Nats. un-tu «Lviv. Politekhnika».* № 897, 3–15.
15. DSTU 9106:2021 Turystychni posluhy. Khostely. Zahalni vymohy ta klasyfikatsiia [Tourist services. Hostels. General requirements and classification] (2022). Retrieved from: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=95566
16. Malska, M. P., Pandiak, I. H. (2009). Hotelnyi biznes: teoriia ta praktyka [Hotel business: theory and practice]. K: Tsentr uchbovoi literatury, 472 p.

-
17. Mykoliuk, O. A., Prylepa, N. V. (2015). Formuvannia systemy upravlinnia yakistiu pidpriemstv hotelnoho biznesu [Formation of the quality management system of hotel business enterprises]. *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Ekonomichni nauky*, 2(2), 309–312.
 18. The official site of online booking: Booking.com (2024). Retrieved from: <https://www.booking.com>
 19. The official site of online booking: Hotels-of-ukraine. Retrieved from: <https://www.hotels-of-ukraine.com/en/>
 20. Poplavska, I. V. (2011). Terytorialna orhanizatsiia hotelnoho hospodarstva Ukrainy [Territorial organization of the hotel industry of Ukraine]: avtoref. dys. ... kand. heohr. nauk : 11.00.02. Kyiv. nats. un-t im. T. Shevchenka. K., 20 p.
 21. Timar, I. V. (2015). Vplyv imidzhu pidpriemstva sfery hotelnykh posluh na formuvannia yoho konkurentnykh perevah [The influence of the image of the enterprise in the field of hotel services on the formation of its competitive advantages]. *Visnyk Dnipropetrovskoho universytetu. Seriia: Ekonomika*, T. 23, vyp. 9(3), 145–149.

UDC 338.48.640.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.20>

Yudina O. I., Doctor of Economics, Professor,
Department of International Tourism and Hotel
and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0003-3699-5321

Nebaba N. O., Doctor of Economics, Associate Professor,
Department of Economic Modeling, Accounting and Statistics
Oles Honchar Dnipro National University
ORCID: 0000-0003-1264-106X

Sabirov O. V., PhD, Associate Professor,
Department of International Tourism and Hotel
and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0001-9436-0477

Saihak Ye. L., PhD, Department of International Tourism
and Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-6406-9272

Altunin K. O., Higher Education Student,
University of Customs and Finance
ORCID: 0009-0009-3718-6930

ANALYSIS OF COMPETITIVENESS OF ENTERPRISES IN THE RESTAURANT SERVICES MARKET

The article conducts a comparative analysis and evaluation of the market positions of restaurant enterprises to identify key areas for their development and ways to increase their competitiveness in the food service market. The main goal of this article is to analyze the competitiveness and assess the development potential of restaurant enterprises in the Dnipropetrovsk region, justifying ways to improve their market positions.

The study analyzes the current restaurant services market and identifies key development directions, including the growth of demand for healthy food, technological progress, the development of gastronomic tourism, social media, and information technologies. A comparative graph-analytical method for determining competitiveness and ranking restaurant enterprises is formulated, consisting of operations such as forming criteria parameters and establishing their weights, selecting competitors, determining ranking characteristics, calculating competitiveness indicators and overall enterprise ranking, identifying leaders and outsiders, building a competitiveness matrix and zone, and determining the radius of the leaders' circle.

Based on the results of the graph-analytical analysis, the indicators for evaluating the potential of the studied enterprises in the restaurant services market of the Dnipropetrovsk region were calculated according to defined criteria parameters, as well as their level of competitiveness. Using the obtained indicators, a matrix and a graph of the competitive positions of the establishments were built. By determining the placement range of each food enterprise in the competitive field zone, their positions were characterized as follows: the "Silver" restaurant is in the zone of untapped potential; the "Magnum" restaurant is closest to the leader in the attack waiting zone; the "Oasis" restaurant is in the leaders' zone, and the "Kvitan" restaurant is in the outsiders' zone.

Based on the evaluation results of the "Kvitan" enterprise, proposals for improving its activities and strengthening its competitive positions were formulated, including: improving the atmosphere, increasing comfort and service quality, enhancing staff qualifications, and greening the restaurant's territory.

Key words: restaurant services market, food enterprises, competitiveness, analysis, graph-analytical method, evaluation indicators, criteria parameters.

Юдіна О. І., Небаба Н. О., Сабіров О. В., Сайгак Є. Л., Алтунін К. О. Аналіз конкурентоспроможності підприємств на ринку ресторанних послуг

У статті проведено порівняльний аналіз та здійснено оцінку ринкових позицій закладів ресторанного господарства, виявлено ключові напрями їх розвитку та шляхи підвищення конкурентоспроможності на ринку ресторанних послуг. Основною метою статті є проведення аналізу конкурентоспроможності та оцінювання потенціалу розвитку підприємств ресторанного господарства, обґрунтування напрямів покращення їх ринкових позицій.

Проведено аналіз стану сучасного ринку ресторанних послуг, виявлено ключові напрями його розвитку. Розглянуто процедуру порівняльного графоаналітичного методу визначення конкурентоспроможності та рейтингу підприємств ресторанної сфери, що складається із таких елементів: формування критеріальних параметрів та встановлення їх питомої ваги; вибір підприємств-конкурентів аналогічного типу; визначення рангу оцінювальних характеристик; розрахунок індикаторів конкурентоспроможності та загального рангу підприємства; встановлення підприємства-лідера і підприємства-аутсайдера; побудова матриці, графіку та зони конкурентоспроможності й визначення радіусу кола лідерів підприємств.

У ході графоаналітичного аналізу розраховано індикатори оцінювання потенціалу досліджуваних підприємств на ринку ресторанних послуг за визначеними критеріальними параметрами, а також рівень їх конкурентоспроможності. На основі отриманих показників побудовано матрицю та графік конкурентних позицій досліджуваних закладів ресторанного господарства, а також встановлено діапазон їх розташування у зоні конкурентного поля. Це дозволило встановити ринкове становище ресторанних підприємств, яке характеризується такими особливостями: ресторан «Silver» розміщується у зоні невикористаного потенціалу; ресторан «Магnum» знаходиться найближче до лідера, у зоні очікування нападу; ресторан «Оазис» займає зону лідерів, а ресторан «Квітан» – зону аутсайдерів. За результатами оцінювання положення ресторанного підприємства «Квітан» сформульовано пропозиції щодо удосконалення його діяльності та зміцнення конкурентних позицій, які включають: покращення атмосфери, підвищення рівня комфорту, якості обслуговування, кваліфікації персоналу та озеленення території ресторану.

Ключові слова: ринок ресторанних послуг, підприємства харчування, конкурентоспроможність, аналіз, графоаналітичний метод, оцінювальні показники, критеріальні параметри.

Introduction. The restaurant services market is a dynamic and competitive environment with a diverse range of food enterprises. The global food service market is constantly increasing due to the growing demand for various types of restaurant products and the income level of the population, as well as its structure being reshaped by changing social processes and consumer taste preferences. Therefore, the restaurant services market represents a combination of food enterprises and consumers forming aggregated demand and supply, as well as relationships between sellers and consumers of restaurant products. Currently, it is characterized by instability and a highly competitive environment where competitive processes occur among food enterprises for offering diverse services and culinary masterpieces to satisfy consumers' evolving and varied needs. Thus, important components in ensuring sustainable leading positions in each market segment include: analyzing external environment factors and competitors' activities, identifying key development directions for the restaurant services market, and justifying ways to increase competitiveness and the development level of the enterprise based on the obtained data.

Analysis of Recent Research and Publications. Many scientific works by foreign and domestic scientists are dedicated to the problem of analyzing and evaluating enterprise competitiveness. Theoretical problems and methodological approaches to determining competitive advantages are highlighted in the scientific works of F. Kotler, J.-J. Lamben, D. Evans, I. Ansoff, A. Marshall, O'Shaughnessy, V. Geets, A. Mazaraki, T. Ostashko, and others. The theory of competitive advantage by M. Porter is based on reducing costs and efficient resource use [1], A. Marshall's equilibrium theory focuses on maximizing sales and profits [2], A. Mazaraki emphasizes the importance of financial, economic, technical, and material competitive advantages [3], T. Ostashko examines approaches to evaluating product price competitiveness [4]. However, issues related to evaluating and justifying enterprise competitiveness based on ranking criteria remain not fully disclosed.

Purpose. The purpose of this article is to analyze the competitiveness and assess the development potential of restaurant enterprises in the Dnipropetrovsk region, justifying ways to improve their market positions.

Results. Competitiveness is an important characteristic of an economic entity and is determined by its advantage over similar enterprises in this sector, both domestically and internationally. Competitiveness is not an inherent quality of an establishment; it can only be assessed within a group of enterprises in the same industry or producing similar products and services. Therefore, the level of competitiveness can only be established by comparing enterprises within a specific market segment.

Thus, the level of competitiveness of an enterprise can be determined based on distinctive characteristics of its development, operational efficiency, and the satisfaction of people's needs with its products and services compared to competitors. Competitiveness indicators indicate the ability and dynamics of an economic entity to adapt to market competitive environment conditions. The key task for an enterprise in forming competitive advantages is achieving and maintaining a dominant position based on the ability to produce products and services at a higher and better level than competitors in this market.

The main essence of the modern restaurant services market is the combination of gastronomic experiences, high-quality service, and creating a special atmosphere that together form a unique experience for consumers.

Currently, restaurant services are characterized by a wide range of cuisines and cultures satisfying various tastes and preferences. Restaurants can specialize in one cuisine or represent international culinary traditions. An important aspect of progressive restaurants' activities is attention to product quality, using only fresh, high-quality, and one hundred percent natural ingredients. This contributes to the creation of exquisite food and meeting guests' needs.

Modern restaurants strive to personalize each consumer's experience by using an individual approach to service, considering guests' preferences and needs. Applying innovations and technological advancements is now widespread in the restaurant industry, where new technologies are implemented in management and service processes, such as online table reservations, mobile apps for food ordering, electronic menus allowing direct order transmission from the guest to the kitchen, loyalty programs, and more. The development of online platforms is a characteristic of modern restaurants that actively use the Internet and social media to promote and realize their services. Having websites and being present in social media improves consumer engagement and interaction. Restaurants are increasingly focusing on social responsibility and creating conditions for sustainable development by implementing environmentally friendly practices, using local products, minimizing waste, and supporting social initiatives.

Successful restaurants meticulously work on creating a unique atmosphere and design that attract consumers. They skillfully use decor, lighting, music, and other elements to create a pleasant and comfortable environment for their guests. The development of gastronomic tourism is one of the key directions in the modern restaurant services market, aiming to enjoy local cuisine and gain unforgettable gastronomic experiences. Restaurants become important tourist attractions, offering culinary tours, tastings, and various national gastronomy delicacies. The main key directions of the restaurant services market development in recent years are shown in Fig. 1.

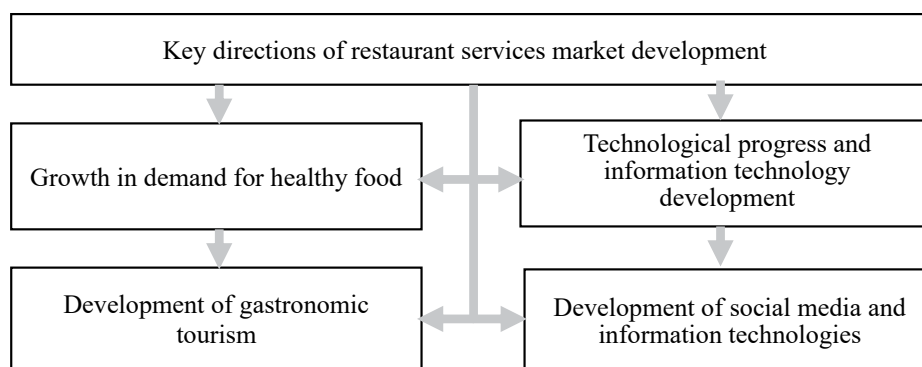


Figure 1. Key directions of restaurant services market development

Source: compiled by the authors

These modern development directions indicate that the restaurant services market has become more diverse, innovative, and focused on satisfying consumer needs in recent years. To ensure their competitive positions, restaurants actively adapt to changes, implementing unique gastronomic offerings and new approaches to improving visitor service quality.

One of the important tools for determining the competitiveness level of food enterprises and justifying ways to improve it is the comparative graph-analytical method. This analysis method allows identifying the strengths and weaknesses of a restaurant enterprise compared to competitors and justifying effective strategies and tactics aimed at increasing the rating and strengthening the competitive positions of the economic entity based on the obtained evaluation data. The graph-analytical method involves determining the enterprise's position in the market and measures for its improvement, performed according to a specific procedure (Fig. 2).

Thus, the procedure of the comparative graph-analytical method for determining the competitiveness and rating of an establishment in the restaurant services market includes the following sequential operations: forming a list of criteria parameters (standard characteristics) that are evaluation characteristics of competitiveness; establishing the weight of the criteria parameter based on expert assessment; selecting enterprises of a similar type that are the closest competitors; determining the ranking of the enterprise's evaluation characteristics based on the absolute values of the selected evaluation parameters (according to the best result); calculating the overall ranking of each enterprise considering the weight (significance) of each evaluation parameter indicator; identifying the leader and outsider enterprise and the distance range between them; building a competitiveness matrix and graph for enterprises in the restaurant services market; determining the radius of the leaders' circle (outsiders); determining the level of competitiveness (competitive positions) of the enterprise in the restaurant services market.

Determining the competitiveness of four similar restaurant enterprises in the Dnipropetrovsk region («Kvintan», «Silver», «Magnum», «Oasis») operating in the same segment of the food services market using the specified

method is based on criteria that are most important to visitors according to survey results, namely: food taste, service quality, price-quality ratio, establishment atmosphere, and rating. The results of the analysis with the defined evaluation scores and ranks established by their ranking are presented in Table 1.

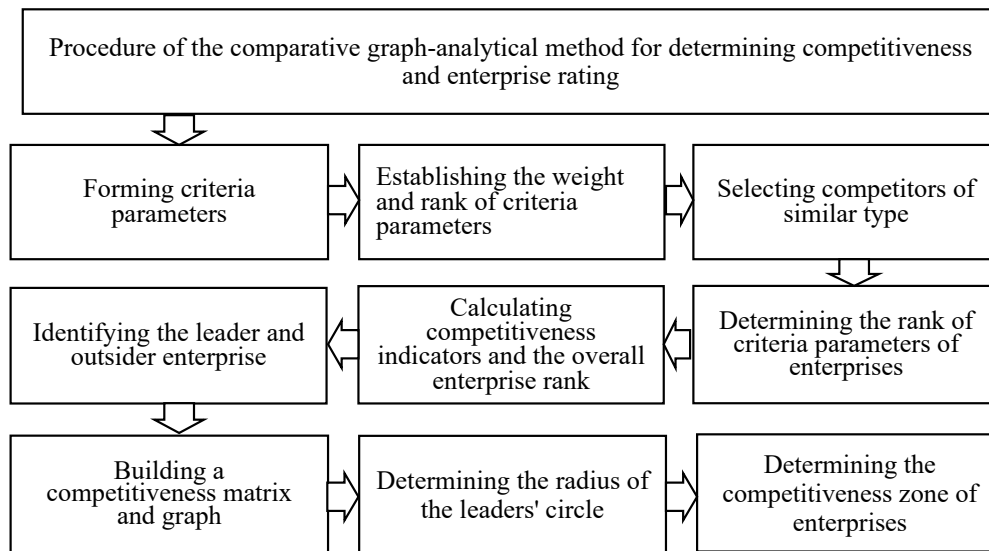


Figure 2. Procedure of the comparative graph-analytical method for determining competitiveness and enterprise rating

Source: compiled by the authors

Table 1

Evaluation of competitiveness potential of enterprises in the restaurant services market of the Dnipropetrovsk region

№	Enterprise Name	Evaluation (Criteria) Parameters									
		Food Taste (FT)		Service Quality (SQ)		Price-Quality Ratio (PQR)		Atmosphere (A)		Rating (R)	
		ball (B_{FT})	rank	ball (B_{SQ})	rank	Ball (B_{PQR})	rank	Ball (B_A)	rank	ball (B_R)	rank
1	Silver	4,52	3	4,37	2	4,6	3	4,11	3	4,88	3
2	Magnum	4,1	4	4,67	1	4,85	2	4,38	1	4,89	2
3	Oasis	4,8	2	4,18	4	4,91	1	4,29	2	4,9	1
4	Kvitan	4,81	1	4,25	3	4,41	4	4,1	4	4,7	4
Weight of the Evaluation Parameter (V_i)		0,22		0,19		0,37		0,09		0,13	
		$\sum V_i = 1$									

Source: developed by the authors

Based on the data presented in Table 1, the calculation of the weighted (by significance) indicator "food taste" for each enterprise, characterizing its competitiveness level according to the specified criteria parameter, is performed according to the formula:

$$I_{FT} = B_{FT} * V_{FT} \quad (1)$$

where I_{FT} – competitiveness indicator by the criterion "food taste" of the i-th enterprise;

B_{FT} – rank of the i-th enterprise in the evaluation environment;

V_{FT} – weight of the criteria parameter "food taste" (0.22).

According to the calculations, the weighted indicator "food taste" (I_{FT}) for the «Silver», «Magnum», «Oasis», and «Kvitan» restaurants was 0.994, 0.902, 1.056, and 1.058, respectively.

The competitiveness indicator by the criterion "service quality" considering its weight is determined as follows:

$$I_{SQ} = B_{SQ} * V_{SQ} \quad (2)$$

where I_{SQ} – competitiveness indicator by the criterion "service quality" of the i-th enterprise;

B_{SQ} – rank of the i-th enterprise in the evaluation environment;

V_{SQ} – weight of the criteria parameter "service quality" (0.19).

The obtained values of the indicator (I_{SQ}) for the aforementioned food enterprises are 0.830, 0.887, 0.794, and 0.807, respectively.

The evaluation of the competitiveness of the studied restaurant establishments based on the indicator "price-quality ratio" is performed according to the following mathematical expression:

$$I_{PQR} = B_{PQR} * V_{PQR} \quad (3)$$

where I_{PQR} – competitiveness indicator by the criterion "price-quality ratio" of the i-th enterprise;

B_{PQR} – rank of the i-th enterprise in the evaluation environment;

V_{PQR} – weight of the criteria parameter "price-quality ratio" (0.37).

The weight of the indicator "price-quality ratio" (I_{PQR}) for the «Silver», «Magnum», «Oasis», and «Kvitan» restaurants is 1.702, 1.794, 1.816, and 1.631, respectively.

The significance of the indicators "establishment atmosphere" and "rating" is calculated similarly using formulas 4 and 5:

$$I_A = B_A * V_A \quad (4)$$

where I_A – competitiveness indicator by the criterion "establishment atmosphere" of the i-th enterprise;

B_A – rank of the i-th enterprise in the evaluation environment;

V_A – weight of the evaluation parameter "establishment atmosphere" (0.09);

$$I_R = B_R * V_R \quad (5)$$

where I_R – competitiveness indicator by the criterion "rating" of the i-th enterprise;

B_R – rank of the i-th enterprise in the evaluation environment;

V_R – weight of the criteria parameter "rating" (0.13).

The obtained values of the indicative indicators of the analyzed enterprises «Silver», «Magnum», «Oasis», and «Kvitan» by the criterion "establishment atmosphere" were 0.369, 0.394, 0.386, 0.369, and by the criterion "rating" – 0.634, 0.635, 0.637, 0.611, respectively.

The next step in determining the competitiveness level of food enterprises in the restaurant services market is calculating the overall weighted rank of their indicative indicators:

$$R_{JiovrI} = \sum B_{ji} * V_{ji} \quad (6)$$

where R_{JiovrI} – overall weighted rank of the evaluation parameters;

$\sum B_{ji} * V_{ji}$ – sum of competitiveness indicators (indicative) of the j-th criteria parameter of the i-th enterprise.

Thus, the calculated values of the overall weighted rank of the evaluation parameters of the «Silver», «Magnum», «Oasis», and «Kvitan» restaurants and the results of their ranking are presented in Table 2.

Table 2

Ranking of the overall rank of the evaluation parameters of enterprises

№	Enterprise Name	Overall Rank, R_{JiovrI}	Ranking
1	Silver	4,529	III
2	Magnum	4,612	II
3	Oasis	4,689	I
4	Kvitan	4,476	IV

Source: compiled by the authors

Based on the ranking of the overall rank of the competitiveness indicators of the aforementioned establishments, it was established that the «Oasis» restaurant is the leader (L) and the «Kvitan» restaurant (A) is the outsider in the studied segment of the restaurant services market of the Dnipropetrovsk region.

Using the obtained data and formula 7, the range of lagging of the outsider enterprise from the leader is established:

$$D_{BL-A} = R_{Lovrl} - R_{Aovrl} \quad (7)$$

where D_{BL-A} – range of lagging of the leader from the outsider;

R_{Lovrl} – overall weighted rank of the leader enterprise;

R_{Aovrl} – overall weighted rank of the outsider enterprise.

Thus, the range of lagging of the «Kvitan» restaurant (D_{BK}) from the "Oasis" restaurant is 0.213 (i.e., 4.689 – 4.476).

The lagging of each enterprise from the leader enterprise is determined as the difference between their overall weighted ranks:

$$D_{Bi} = R_{Lowrl} - R_{Ri} \quad (8)$$

where D_{Bi} – range of lagging of the i-th enterprise;
 R_{Lowrl} – overall weighted rank of the leader enterprise;
 R_{Ri} – overall weighted rank of the i-th enterprise.

According to the calculations, the lagging ranges of the «Silver» (D_{BS}) and «Magnum» (D_{BM}) restaurants from the leading establishment in the food services market were 0.16 (4.689 – 4.529) and 0.077 (4.689 – 4.612), respectively.

The level of competitiveness of each food enterprise in the restaurant services market is determined by dividing the lagging range of the i-th enterprise by the maximum lagging range (between the leader and outsider):

$$CM_{Ei} = \frac{R_{Lowrl} - R_{Ri}}{D_{VL-A}} \quad (9)$$

where CM_{Ei} – level of competitiveness of the i-th enterprise;
 R_{Lowrl} – rank of the leader enterprise;
 R_{Ri} – rank of the i-th enterprise;
 D_{VL-A} – lagging range of the leader from the outsider.

The obtained evaluation parameters serve as the basis for creating a competitiveness matrix (Table 3) and building a graph of the competitive positions of enterprises (Fig. 1).

Table 3

Competitiveness matrix of enterprises

№	Enterprise Name	Evaluation Parameters							
		Rank I_{FT}	Rank I_{SQ}	Rank I_{POR}	Rank I_A	Rank I_R	overall rank $\sum Ri$	range D_{Bi}	CM_{Ei}
1	Silver	0,994	0,830	1,702	0,369	0,634	4,529	0,16	0,751
2	Magnum	0,902	0,887	1,794	0,394	0,635	4,612	0,077	0,361
3	Oasis	1,056	0,794	1,816	0,386	0,637	4,689	0	0
4	Kvitan	1,058	0,807	1,631	0,369	0,611	4,476	0,213	1

Source: developed by the authors

Thus, to build a graph of the competitive positions of food enterprises, the overall rank indicators and lagging range values, serving as coordinate points for the X and Y axes, are chosen and correlated as follows: (4.529; 0.16) – for the «Silver» restaurant; (4.612; 0.077) – for the «Magnum» restaurant; (4.689; 0) – for the «Oasis» restaurant; (4.476; 0.213) – for the «Kvitan» restaurant (Fig. 3).

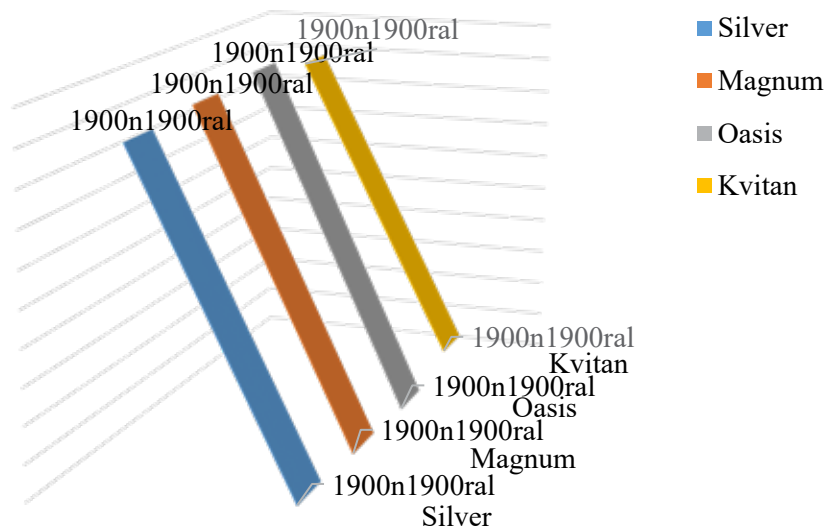


Figure 3. Competitive positions of the studied restaurant establishments

Source: developed by the authors

The competitiveness zone of enterprises in the studied segment of the restaurant services market of the Dnipropetrovsk region is established by calculating the lagging range radius (10) and constructing the corresponding graphical circle radii based on the obtained data (Fig. 4):

$$R_i = \frac{D_{Bi}}{4}, \quad (10)$$

where R_i – lagging range radius;
 D_{Bi} – range of the i -th enterprise.

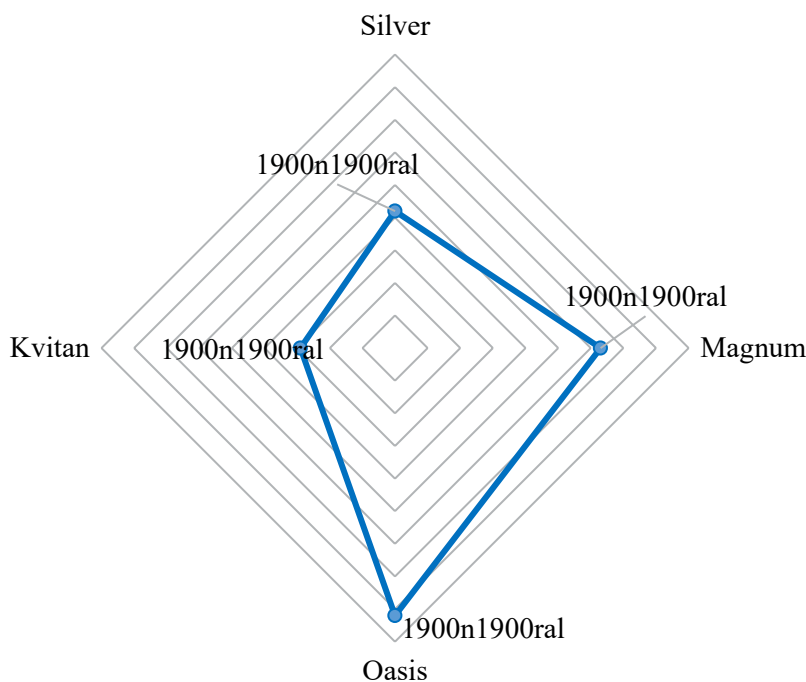


Figure 4. Radius of Lagging Range of Studied Enterprises from the Leader Enterprise

Source: compiled by the authors

Using the radius value, the position of each enterprise is determined by establishing the range limits according to the following mathematical inequality:

$$R_{Jiovrl} < R_i \leq D_{Bi} + Rd_L, \quad (11)$$

where Rd_L – leader's range radius;

Performing the corresponding mathematical operations allows characterizing the placement features of each restaurant establishment in the competitive field zone: «Silver» restaurant: $4.529 < R_s \leq 5.701$ – is in the untapped potential zone; «Magnum» restaurant: $4.612 < R_M \leq 5.784$ – is closest to the leader in the attack waiting zone; «Oasis» restaurant: $4.689 < R_O \leq 5.861$ – is in the leaders' zone; «Kvitan» restaurant: $4.476 < R_K \leq 5.648$ – is in the outsiders' zone.

Based on the evaluation results of the «Kvitan» enterprise's position in the food services market, the following proposals for improving its activities and strengthening its competitive positions can be formulated: improving the atmosphere (creating a cozy and aesthetic environment, ensuring rational planning of lighting points, improving musical accompaniment of the service process); increasing comfort and service quality (upgrading the restaurant's material and technical base, replacing used furniture, installing climate control and new ventilation systems, installing sound insulation, replacing decor and menu according to seasons); enhancing staff qualifications (monthly knowledge control of the menu and service standards, forming corporate culture, introducing checklists); greening the restaurant's territory.

Implementing these recommendations will help improve the atmosphere in the «Kvitan» restaurant establishment, making it more attractive to guests, thereby increasing the number of consumers and the establishment's profit.

Conclusions. Conducting an analysis and evaluation of the competitiveness potential of enterprises in the restaurant services market of the Dnipropetrovsk region based on the graph-analytical method allowed identifying leaders and outsiders in this market segment, assessing their potential, determining strengths and weaknesses according to selected criteria parameters, and identifying directions for improving activities and increasing the

competitiveness of these restaurant enterprises. Using this method will allow economic entities to constantly monitor and analyze competitive positions according to various evaluation characteristics and justify management decisions to ensure the enterprise's dominance in the restaurant services market.

Bibliography:

1. Портер М. Конкуренція. Київ, 2001. 387 с.
2. Маршал А. Принципи економічної науки. Т. 1. 1983. 401 с.
3. Мазаракі А.А., Лігоненко Л.О., Ушакова М.М. Економіка торговельного підприємства. Київ : Хрещатик, 1999. 800 с.
4. Осташко Т.О. Аналіз конкурентоспроможності товарів м'ясомолочної групи на внутрішньому ринку України в умовах СОТ. *Освітній портал «Облік і фінанси АПК»*. URL: <https://magazine.faaf.org.ua/analiz-konkurentospromozhnosti-tovariv-m-yasomolochnoi-grupi-na-vnutrishnomu-rinku-ukraini-v-umovah-sot.html>.

References:

1. Porter, M. (2001). Competition. Kyiv, 387 p
2. Marshal, A. (1983). Principles of economic science. Vol. 1. 401 p.
3. Mazaraki, A.A., Ligonenko, L.O. & Ushakova, M.M. (1999) Economy of trading enterprise. Kyiv: Khreshchatyk. 800 p.
4. Ostashko T.O. Analysis of the competitiveness of products of the meat and dairy group in the domestic market of Ukraine under WTO conditions. Educational portal "Accounting and Finances of Agricultural Industry". URL : <https://magazine.faaf.org.ua/analiz-konkurentospromozhnosti-tovariv-m-yasomolochnoi-grupi-na-vnutrishnomu-rinku-ukraini-v-umovah-sot.html>.

UDC 640.43

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-2-68.21>

Yudina O. I., Doctor of Economics, Professor,
Department of International Tourism and Hotel
and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0003-3699-5321

Nebaba N. O., Doctor of Economics, Associate Professor,
Department of Economic Modeling, Accounting and Statistics
Oles Honchar Dnipro National University
ORCID: 0000-0003-1264-106X

Korneyev M. V., Doctor of Economics, Professor,
Dean of the Faculty of Innovative Technologies
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-4005-5335

Vyshnikina O. V., PhD, Associate Professor,
Department of International Tourism and Hotel
and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-3747-2904

Altunin K. O., Higher Education Student,
University of Customs and Finance
ORCID: 0009-0009-3718-6930

TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF THE RESTAURANT SERVICES MARKET: METHODS OF DETERMINATION AND CHARACTERISTICS

Methodical approaches to determining the current state and development trends of the restaurant services market which serve as a toolkit for forecasting future dynamic changes in the industry and planning measures for the adaptation of enterprises to the new conditions of the organization of their activities are considered in the article. The purpose of this article is the study of modern trends in the development of the restaurant services market and the formation of methodical approaches to their determination.

In this study, based on the analysis of the external environment of restaurant establishments, the main methods for determining the current state of the catering services market are established, which include the methods of analyzing market stability, consumer preferences, competitive environment, and segmentation. With the help of the formed methodological toolkit, the following is carried out: survey of consumers; study of new popular dishes, recipes, technologies and trends in the industry; analysis of menus, concepts, price policy; forecasting future directions of industry development. The use of these methods allows: to determine the features of demand, supply and market equilibrium; evaluate and characterize changes in consumer needs; establish competitive advantages and disadvantages in the operation of the enterprise; determine the target audience according to established criteria. Based on the mentioned approaches and methods, the main trends affecting the development of the restaurant services market were identified and characterized.

Thus, it was proven that the key directions of the development of the restaurant services market are the growing popularity of healthy food, the development of social media and information technologies, technological progress, and the development of gastronomic tourism. Certain methods are used as a tool for determining trends in the development of the industry, which provide the ability to adapt restaurant enterprises to dynamic changes in the service market. They include: marketing research methods, analysis of trends in the gastronomic industry, observation of competitors, cooperation with specialists and experts, analysis of changes in consumer demand. With the help of these methods, the main trends in the development of the restaurant business were determined, namely: economic, gastronomic, technological innovations, macroeconomic and demographic factors. These trends characterize the demand for restaurant services, the development of the restaurant business, digital development, changing consumption habits and the state of the consumer market.

Key words: market of restaurant services, development, food enterprises, methods, development trends.

© O. I. Yudina, N. O. Nebaba, M. V. Korneyev, O. V. Vyshnikina, K. O. Altunin, 2024

Юдіна О. І., Небаба Н. О., Корнєєв М. В., Вишнікіна О. В., Алтунін К. О. Тенденції розвитку ринку ресторанних послуг: методи визначення та характеристика

У статті розглянуто методичні підходи до оцінки сучасного стану та трендів розвитку ринку ресторанних послуг, які служать інструментарієм для прогнозування майбутніх динамічних ринкових змін. Метою статті є дослідження сучасних тенденцій розвитку ринку ресторанних послуг. У даному дослідженні на основі аналізу зовнішнього оточення закладів ресторанного господарства встановлено основні підходи до визначення сучасного стану ринку ресторанних послуг, до яких відносяться: аналіз ринкової стійкості, споживчих переваг, конкурентного середовища, сегментації. За допомогою сформованого методичного інструментарію здійснюється: опитування споживачів; вивчення нових популярних страв, рецептур, технологій та трендів в галузі; аналіз меню, концепцій, цінової політики; прогнозування майбутніх напрямів розвитку галузі. Використання цих підходів дозволяє: визначити особливості попиту, пропозиції та ринкової рівноваги; оцінити та охарактеризувати зміни потреб споживачів; встановити конкурентні переваги та недоліки у роботі підприємств ресторанного господарства; визначити цільову аудиторію за встановленими критеріальними ознаками. На основі зазначених підходів виявлено та охарактеризовано основні тенденції, що впливають на розвиток ринку ресторанних послуг. Встановлено, що ключовими напрямками розвитку ринку ресторанних послуг є зростання популярності здорового харчування, розвиток соціальних медіа та інформаційних технологій, технологічний прогрес, розвиток гастрономічного туризму. Інструментом визначення тенденцій розвитку галузі служать певні підходи, що забезпечують можливість адаптації ресторанних підприємств до динамічних змін на ринку послуг, до їх складу входять: маркетингові дослідження, аналіз тенденцій у гастрономічній індустрії, спостереження за конкурентами, співпраця зі спеціалістами та експертами, аналіз змін у споживчому попиті. Визначено основні тенденції розвитку ресторанного бізнесу, а саме: економічні, гастрономічні, технологічні інновації, макроекономічні та демографічні. Ці тенденції характеризують попит на ресторани послуг, розвиток ресторанного бізнесу, цифровий розвиток, зміну звичок споживання та стан споживчого ринку.

Ключові слова: ринок ресторанних послуг, розвиток, підприємства харчування, методи, тенденції розвитку.

Introduction. The restaurant services market is a dynamic and competitive environment with a diverse range of food service businesses. It is constantly growing due to changes in taste preferences, increasing incomes and demand for various types of restaurant services. Thus, the market of restaurant services is a set of enterprises and the number of consumers that form the aggregated demand and supply in the market of food services, as well as relationships between sellers and consumers of restaurant products. The development of the restaurant services market is characterized by a number of trends that have a significant impact on the competitiveness of enterprises in this area.

Analysis of Recent Research and Publications. Issues related to the activities of restaurant business establishments operating in the food service market, trends in their development, are covered in the scientific and scientific-methodological works of J. Walker, A. Mazaraki, M. Malska, G. Pyatnytska, P. Pucentailo. The peculiarities of the operation of restaurant business enterprises and the transformation of the restaurant services market were studied by such scientists as B. Andrushkiv [1], O. Kuzmak [2], O. Grigorenko [3] and others. However, in the conditions of dynamic changes and instability of the external and internal environment, there is a need to identify modern trends in the development of the restaurant services market and establish methods for their determination, which determines the purpose of this work.

The purpose of the article is the study of modern trends in the development of the restaurant services market and the formation of methodical approaches to their determination.

Presenting main material. Today, the restaurant sector is developing dynamically and it is an important component of the national food market. At the current stage, there is an increase in demand for healthy food, as consumers become more aware of their health and change their food preferences. Therefore, restaurant establishments focused on the production of dishes from natural and fresh products that correspond to a healthy lifestyle of a person have a dominant position in the competitive environment. Also, today, an important trend in the restaurant market is the growing interest in local and farm products, as consumers increasingly appreciate local suppliers and environmentally friendly production. Catering companies that actively include dishes made from such products in their menu attract the attention of consumers and secure a leading position in the competitive market.

Thus, certain methodological approaches are used to determine modern development trends, consumer needs, and the competitive environment in the modern market of restaurant services (Fig. 1).

Thus, the following methods are used to determine the current state of the restaurant services market: analysis of market stability, which allows to establish the peculiarities of supply and demand, factors affecting the change of these parameters, the volatility of prices for restaurant products and services; analysis of consumer preferences based on marketing research methods aimed at gathering information about consumer needs and requirements, their preferences and expectations; analysis of the competitive environment, which provides the definition of competing enterprises, their strengths and weaknesses, the assessment of price, assortment policy and own brand, as well as the identification of the main factors affecting these characteristics; segmentation, which makes it possible to divide the market into segments according to various criteria (behavioral, psychographic, demographic, geographic, etc.) to determine target audiences and develop strategies aimed at each separate market segment.

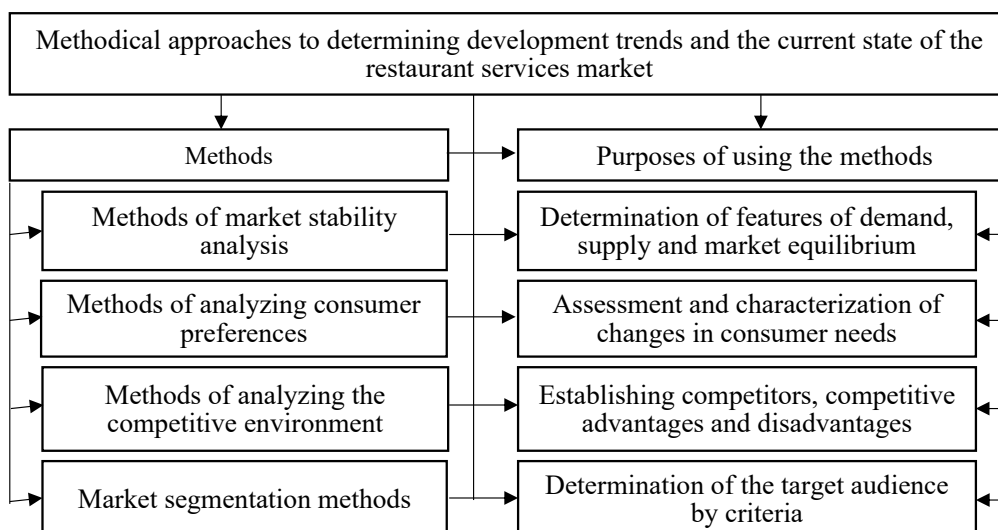


Figure 1. Methodical approaches to determining the current state and development trends of the restaurant services market

Source: compiled by the authors

The methods of determining trends in the development of the restaurant sector are a necessary tool for forecasting the future directions of the industry's development, and, therefore, planning measures to adapt the enterprise to them. Such economic approaches help economic entities to develop strategies and business models taking into account changes in tastes, needs and demands of consumers regarding restaurant products and services. Identifying trends also helps to understand what new concepts, technologies and innovations can be used to improve the guest service process and increase the efficiency of business operations. The use of such methodological tools contributes to the growth of the level of competitiveness of restaurant establishments, allows them to respond more quickly to changes in the surrounding environment, use new opportunities to attract and retain consumers, as well as strengthen their positions in the market by providing unique services, products, forming new concepts that meet modern trends and consumer requirements and are determined using a process approach (Fig. 2).

The process approach involves the step-by-step organization of the research, which is aimed at achieving its main goal, namely, determining the trends in the development of the restaurant services market. This approach includes the following stages of studying the object of research: marketing research, analysis of trends in the gastronomic industry, observation of competitors, cooperation with specialists and industry experts, analysis of changes in consumer demand.



Figure 2. Process approach: the content of the stages and methods of determining trends in the development of the restaurant services market

Source: compiled by the authors

The determination of trends in the development of the restaurant services market is carried out on the basis of marketing research, which is based on key methods of studying the characteristics of the external environment and its impact on the internal state of the enterprise. Such studies are aimed at collecting information about the needs and

requirements of consumers, their preferences, expectations and include methods of consumer surveys, focus groups, and data analysis. This allows for first-hand information about tastes, priorities and changes in the consumption of food products and restaurant services, and therefore helps restaurants to develop effective strategies and adapt to changes in the external environment.

At the stage of analysis of trends in the gastronomic industry, innovative products and processes occurring in the restaurant industry are studied, including new culinary directions, popular dishes, concepts, technologies of service and production of restaurant products that appear on the market. This analysis is based on the study of gastronomic magazines, blogs, social media, as well as experience from participation in exhibitions and conferences of the gastronomic industry.

At the stage of monitoring competitors, competitor enterprises in the restaurant services market are analyzed in order to determine their development and innovation strategies. Research may include analysis of menus, concepts, costs, pricing and assortment policies, marketing strategies, quality of products and services, and other aspects of competitors' activities.

Cooperation with specialists and experts involves interaction and establishment of partnership relations with gastronomic consultants, chefs, experts in the field of restaurant business. The high professionalism, extensive experience and knowledge of these specialists about the gastronomic industry help to identify trends and predict the future directions of the industry's development. Valuable advice and insights of specialists contribute to the formation of optimal decisions regarding the development of the enterprise.

Analysis of changes in consumer demand for restaurant services and products also includes changes in tastes, diets, eating styles, and preferences for popular ingredients. At this stage, the analysis of statistical data, social changes, research into consumer habits, trends in the food industry, etc. is carried out.

Defining and adapting to the development trends of the restaurant services market is an important aspect in the activities of catering enterprises to ensure their competitiveness. This approach enables restaurant establishments to adapt to modern development trends, to respond in time to changes in taste preferences and consumer requirements, to improve the quality of service, and therefore to form dominant positions on the market.

Based on the mentioned approaches and methods, the main trends affecting the development of the restaurant services market were identified (Fig. 3).

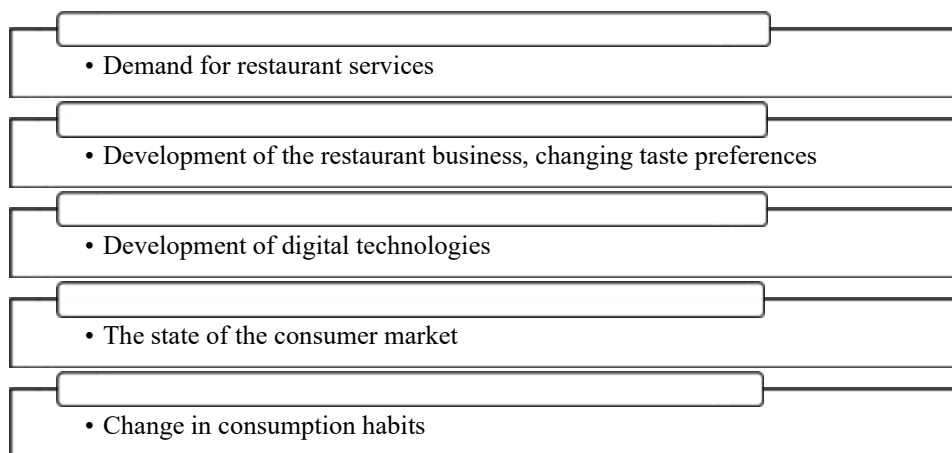


Figure 3. Development trends of the restaurant services market and their characteristics

Source: compiled by the authors

Economic trends affect the demand in the field of restaurant services, since the amount of consumer demand largely depends on such economic factors as the level of gross domestic product, the level of inflation, unemployment and the level of income of the population in the country (region).

Gastronomic trends today are characterized by the following areas: food pairing (searching for the perfect food pairing with drinks); experiential cuisine (participation of guests in the process of preparing ordered dishes); solo dinner in a restaurant; gastro tours with maximum immersion in local culture; zero-kilometer kitchens (creation by restaurants of their own gardens, vegetable gardens and farms at a short distance from the establishment and the offer of ecologically clean, vegetable-oriented farm dinners); growing demand for functional products that provide additional health benefits (increased immunity, mental energy, performance, relaxation, improved mood and sleep) and ancient cereals (buckwheat, rye, millet, barley, sorghum, amaranth) characterized by high the content of fiber, protein, vitamins and minerals.

These trends are related to solving the problem of ensuring and preserving the health of consumers. Currently, there is an increase in demand for dishes made from ecologically clean raw materials (without GMOs, pesticides,

herbicides and other chemicals) and fresh products. Ensuring these needs requires food enterprises to improve logistics systems, in particular such elements as transportation, loading and unloading operations, product storage.

Adaptation to changes in taste preferences and adaptation of establishments to modern requirements can ensure increased profits due to an increase in the number of visitors and the turnover of places by organizing food services that meet the conditions of a healthy lifestyle, environmental friendliness, the latest gastronomic concepts, exotic cuisines, etc.

Innovations and new technologies in the restaurant business today are becoming a mandatory element for attracting and retaining consumers, whose demands are constantly growing. New technologies are important both for restaurant visitors (from the point of view of maximizing the convenience, level of comfort and usefulness of services), and for enterprises, since technological innovations ensure the improvement of the management process, increasing the efficiency of their production and service activities.

Services of restaurant establishments are characterized by complexity and include such components as concept, cuisine, service technologies, atmosphere, organization of business processes, etc. Therefore, the introduction of new technologies and other innovations in any of the specified components can increase the number and loyalty of consumers and bring business success.

Advanced technologies use the advantages of digitalization, the possibilities of interaction and integration, and allow them to be used comprehensively to increase the positive impact on the development of the activities of food enterprises. According to Western researchers and restaurateurs, important directions in which new technologies will be developed in the near future include: customer service (working with orders); loyalty programs; payment options; robots and automation.

In the modern market of restaurant services, there is a growing demand for healthy, functional food, which involves the balance of the main food components in accordance with the age, gender, intensity and characteristics of a person's labor activity. Innovative services that ensure proper nutrition include the creation of a suitable menu with the calculation of fats, proteins, carbohydrates and calories, as well as the possibility of delivering these dishes to the specified address. Certain technologies are used to provide such services. POS systems and their following functions are in demand in the restaurant business: credit card processing; inventory management, labor organization, loyalty program; mobile payments, accounting, cloud systems. One of the most popular programs in the field of digital technology today is R-Keeper. This program allows you to improve the process of production, warehouse and restaurant management in general based on systems for remote monitoring of restaurant operations, automation of the warehouse, delivery service, receiving orders and transferring them to the kitchen, CRM system. In addition, R-Keeper contributes to the effective organization of staff work and the formation of a customer loyalty system with the help of such software tools as mobile waiter terminals, electronic menu and cash register stations on a tablet, virtual guest card, automatic table reservation system, video control, etc. The program includes a convenient warehouse module, which in online mode shows product balances and current purchase prices with recent dynamics – this allows you to quickly track fluctuations in the cost of meals. Innovations from R-Keeper allow you to automate the business processes of all restaurant establishments, including modern types of food establishments, such as anti-cafes, food trucks, etc.

The "Quick Resto" program refers to the universal automation systems of catering enterprises, the functions of which are: menu creation; settlement with guests; managing the seating of visitors in the hall; creation of loyalty programs; analysis of stock balances. Functionality includes a CRM system and management accounting, combines front-office and back-office.

Jowi software has a cloud-based restaurant automation solution, a fast application that combines front-office and back-office, mobile applications for waiters and chefs, a CRM system and analytics functions. The program allows you to accept orders and reserve tables, organize delivery. The program is convenient to use both from a computer and from a tablet or smartphone.

Modern trends in the development of technologies in the restaurant business are characterized by the use of POS systems, POS terminals, tablet menus (tableservice), touch self-service kiosks (QSR). Digitization and technological innovations in the market of restaurant services contribute to attracting more consumers, increasing their loyalty to the establishment, simplifying the administration process, optimizing business processes, reducing costs and increasing the profit of catering enterprises.

Macroeconomic factors influence the functioning mechanism of the national economy and the country's internal market, which ensures socio-economic development, dynamic changes, shapes the market structure, the order and algorithm of processes, and ensures the patterns of interaction of all its participants. Demographic factors such as the number, composition and structure of the population, features of its territorial location, lifestyle form a certain demand for products and services of restaurant establishments.

Research conclusions and prospects for further research in this direction. In modern economic conditions, the key directions of the development of the restaurant services market are the growing popularity of healthy food, the development of social media and information technologies, technological progress, and the development of gastronomic tourism. Certain methods are used as a tool for determining the trends in the development of the industry, which ensure the possibility of adaptation of restaurant enterprises to dynamic changes in the service market. They

include: marketing research methods, analysis of trends in the gastronomic industry, observation of competitors, cooperation with specialists and experts, analysis of changes in consumer demand. With the help of these methods, the main trends in the development of the restaurant business were determined, namely: economic, gastronomic, technological innovations, macroeconomic and demographic factors. These trends characterize the demand for restaurant services, the development of the restaurant business, digital development, changing consumption habits and the state of the consumer market. The proposed methodological toolkit can be used in further studies of dynamic changes in the market of restaurant services, identification of factors for the development of catering enterprises in future periods of time.

Bibliography:

1. Андрушків Б. М., Добруцька Ю. М. Дослідження особливостей діяльності закладів готельно-ресторанного господарства України у регіональному аспекті. *Актуальні задачі сучасних технологій: матеріали міжнар. наук.-практ. конф.*, 24–25 листоп. 2021 р. Тернопіль. Т. II. С. 61–62.
2. Кузьмак О.І. Напрями розвитку підприємств сфери послуг в умовах місцевого самоврядування. *Сталий розвиток підприємств, регіонів, країн у сучасних ринкових та політичних умовах: матеріали міжнар. наук.-практ. конф.*, 19 – 20 листоп. 2015 р., м. Дніпропетровськ. С. 28–31.
3. П'ятницька Г.Т., Григоренко О.М. Глобальні тренди розвитку кейтерингу. *Зовнішня торгівля: економіка, фінанси, право*, 2019. № 3(104). С. 51–68.

References:

1. Andrushkiv, B.M. & Dobrutka, Yu. M. (2021). Doslidzhennya osoblyvostey diyal'nosti zakladiv hotel'no-restorannoho hospodarstva Ukrainy u rehional'nomu aspekti. [Study of peculiarities of the activity of the hotel and restaurant industry of Ukraine in the regional aspect] *Actual tasks of modern technologies: materials of the international science and practice conference. Ternopil*, vol. 2, pp. 61–62.
2. Kuzmak, O.I. (2015). Napryamy rozvytku pidpryyemstv sfery posluh v umovakh mistsevoho samovryaduvannya. [Directions of development of enterprises in the field of services in the conditions of local self-government]. *Sustainable development of enterprises, regions, countries in modern market and political conditions: materials of the international science and practice conference. Dnipropetrovsk*, pp. 28–31.
3. Pyatnytska, G.T. & Grigorenko, O.M. (2019). Hlobal'ni trendy rozvytku keyteryahu [Global trends in the development of catering]. *Foreign trade: economics, finance, law*, No. 3(104), pp. 51–68.

Яковлєва-Мельник Н. Г., старший викладач кафедри туристичного та готельно-ресторанного бізнесу
ВНПЗ «Дніпровський гуманітарний університет»
ORCID ID: 0000-0002-1266-1813

Джинджоян В. В., доктор економічних наук, професор,
професор кафедри туристичного та готельно-ресторанного бізнесу,
ВНПЗ «Дніпровський гуманітарний університет»
ORCID ID: 0000-0003-0296-4092

СТАНДАРТИЗАЦІЯ В СФЕРІ ГОСТИННОСТІ – НЕОБХІДНІСТЬ СУЧАСНОСТІ Й ФАКТОР ЗАЛУЧЕННЯ ІНОЗЕМНИХ ІНВЕСТИЦІЙ

Стаття присвячена проблемам в сфері гостинності – конкурентоздатності, інвестиційної привабливості, що пов'язані з недостатнім рівнем стійкості, відсутністю гарантій та недотриманням стандартів світового рівня. Авторами дослідження розглянути системи стандартизації та сертифікації різних рівнів, що сьогодні є невід'ємною частиною діяльності учасників ринку гостинності. В статті наведено основні тенденції ринку готельно-ресторанного бізнесу: активне відновлення попиту на послуги гостинності, поєднання роботи на відпочинку («bleisure' stays»), гіперперсоналізація попиту, турбота про здоров'я, що потребують від учасників галузі додаткових зусиль і коштів.

Безперечним підтвердженням якості послуг, управління на підприємстві є дотримання стандартів і норм, показники яких направлені на досягнення цілей сталого розвитку, підприємства, галузі, регіону та країни в цілому. В статті розглянуто особливості стандартів ESRS, IFRS S1 та IFRS S2, набір індикаторів Hotel Sustainability Basics, галузеві критерії GSTC, стандарти ISO.

Не втрачають свою актуальність стандарти, завдяки яким контролюється якість в різноманітних сферах уже не одне десятиліття, а також, на вимогу сучасних проблем, розробляються нові. Стандарти IFRS S1 та IFRS S2, що були видані лише минулого року, націлені на дотримання підприємствами курсу досягнення Цілей сталого розвитку. Стандарти покликані сформувати довіру та впевненість у діяльності підприємств, допомогти знайти спільну мову щодо впливу кліматичних ризиків між інвесторами та бізнесами.

Авторами наведено основні проблемні моменти процесів стандартизації для українського ринку гостинності та подальші перспективи розвитку галузі. Наголошено, що дотримання стандартів різних рівнів та направленостей закладами гостинності – не лише надає гарантії споживачам, під час прийняття рішення про купівлю послуги, але й виступає гарантом сталості та перспективності для інвесторів, що приймають рішення інвестувати нові проекти готельно-ресторанного бізнесу. Такі кроки допоможуть якнайшвидшому відновленню та сталому розвитку вітчизняних підприємств сфери гостинності, зайняття вигідних конкурентних позицій на світових ринках.

Ключові слова: стандарти, стандартизація, сертифікація, міжнародна система стандартизації, іноземні інвестиції, інвестори, послуги гостинності, гостинність, сталий розвиток.

Yakovlieva-Melnyk N. H., Dzhyndzhoian V. V. Standardization in the field of hospitality – the need for modernity and the factor of attracting foreign investments

The article is devoted to problems in the field of hospitality – competitiveness, investment attractiveness, which are associated with an insufficient level of sustainability, lack of guarantees and non-compliance with world-class standards. The authors of the study considered standardization and certification systems of various levels, which today are an integral part of the activities of hospitality market participants. The article presents the main trends of the hotel and restaurant business market: active recovery of demand for hospitality services, combination of work on vacation («leisure' stays»), hyperpersonalization of demand, health care, which require additional efforts and funds from industry participants.

An indisputable confirmation of the quality of services and management at the enterprise is compliance with standards and norms, the indicators of which are aimed at achieving the goals of sustainable development, the enterprise, the industry, the region and the country as a whole. The article examines the features of the ESRS, IFRS S1 and IFRS S2 standards, a set of Hotel Sustainability Basics indicators, GSTC industry criteria, and ISO standards.

Standards that have been working for several decades remain relevant. They control quality in various areas. New problems contribute to the creation of new standards. The IFRS S1 and IFRS S2 standards, which were released just last year, aim to keep companies on track to meet the Sustainable Development Goals. The standards are designed to create trust and confidence in the activities of enterprises, to help find a common language regarding the impact of climate risks between investors and businesses.

The authors present the main problematic points of standardization processes for the Ukrainian hospitality market and further prospects for the development of the industry. It is emphasized that compliance with standards of different levels and directions by hospitality establishments not only provides guarantees to consumers when making a decision to purchase a service, but also acts as a guarantor of stability and perspective for investors who decide to invest in new hotel and restaurant business projects. Such steps will help the fastest recovery and sustainable development of domestic enterprises in the field of hospitality. Domestic enterprises will be able to confidently compete in the global hospitality market.

Key words: standards, standardization, certification, international standardization system, foreign investments, investors, hospitality services, hospitality, sustainable development.

Постановка проблеми. В сучасному світі індустрію гостинності очікують постійні зміни на багатьох рівнях: зміна поведінки споживачів (через вплив зовнішніх і внутрішніх факторів, поява на ринку нових поколінь з новими потребами та уявленнями щодо задоволення рекреаційних потреб), брак персоналу, трансформація класичних бізнес-моделей, переосмислення способу ведення бізнесу з огляду на інтеграційні процеси сфери гостинності.

Майбутня стійка та конкурентоздатна індустрія гостинності України повинна не лише працювати на креативних ідеях, але й активно переходити на сучасні стандарти надання послуг гостинності. Досягнення таких цілей потребує значних додаткових коштів та досвіду управління.

Для прийняття рішення про інвестування об'єкту в сфері гостинності, інвесторами, особливо, фінансовими установами розвитку (DFI), вирішальне значення мають підтвердження, що, даний проект, є таким, що розвивається, сприяє сталому економічному зростанню, або чинить інший позитивний вплив на розвиток, а також гарантує «здорові» фінансові прибутки.

В ролі таких гарантій виступають стандарти різних направленостей і рівнів, що визначають перспективність закладу не лише для клієнтів, але й для бізнесу.

Українська система сертифікації та стандартизації вже не одне десятиліття знаходиться на шляху гармонізації державних стандартів з міжнародними, але ще й до 2024 року не завжди може надати чіткі відповіді щодо відповідності світовим стандартам якості.

Міжнародна рада зі стандартів сталого розвитку (ISSB) 26 червня 2023 року видала стандарти IFRS S1 та IFRS S2, створюючи нову еру розкриття інформації щодо сталого розвитку і клімату на ринках капіталу в усьому світі.

Стандарти покликані допомогти підвищити довіру та впевненість, створити спільну мову про вплив кліматичних ризиків між інвесторами та бізнесами. Тому, актуальним питанням для української сфери гостинності є опанування міжнародних систем сертифікації та стандартизації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Важливість стандартизації та категоризації закладів гостинності, залучення іноземного капіталу та дослідження готельного бізнесу України висвітлюють в своїх роботах ряд науковців: С.С. Галасюк [1], М.В. Грабар [2], І.Л. Сазонець, [3], Н.В. Терещук [4, 5], О.В. Шикіна [6] та інші.

М.В. Грабар наголошує на перевагах процедури категоризації готелів, що надає можливість сегментації ринку готельних послуг та необхідну інформацію потенційним інвесторам і споживачам, що розширює можливість та конкурентоспроможність підприємства. В роботах С.С. Галасюк [1], М.В. Грабар [2], Н.В. Терещук [4,5], наведено досвід різних країн щодо стандартизації послуг гостинності та розкриті різні системи категоризації готельних підприємств, вплив даного процесу на досягнення сталого розвитку, підвищення привабливості закладів. І.Л. Сазонець [3] в своїх роботах досліджує ефективність співпраці з міжнародними організаціями для розвитку сфери гостинності та підвищення конкурентоздатності на світовому ринку. Загалом, в роботах науковців зазначено, що з метою підвищення конкурентоздатності та інвестиційної привабливості вітчизняної сфери гостинності, необхідно дотримуватися міжнародних стандартів управління та якості, удосконалювати та активно впроваджувати процедуру категоризації закладів гостинності в Україні.

Мета статті. Дослідження процесів стандартизації та сертифікації гостинності як інструменту заохочення до іноземного інвестування.

Виклад основного матеріалу. Оцінюючи особливості розвитку готельно-ресторанного бізнесу за 2023 рік можна визначити декілька основних моментів. Перший і, мабуть, найважливіший – це скасування останніх значних обмежень на подорожі, пов'язаних з Covid, що сприяло вивільненню відкладеного попиту. Найактивніше попит відновлювався на ринку відпочинку, особливо в бюджетному та люксовому сегментах.

Друга тенденція в готельній індустрії, яка була очевидною ще й раніше, але, безумовно, прискорилося під час пандемії – це зростання «bleisure' stays» – поєднання бізнесу та відпочинку. Карантинні обмеження спричинили безпрецедентний сплеск дистанційної роботи, і з тих пір багато компаній надають пріоритетність гнучкості в роботі та управлінні.

Щоб задовольнити попит таких потенційних гостей, готелі пропонують такі зручності, як надшвидкісний Wi-Fi, покращені кімнати для переговорів, зручні робочі місця і т.п.

Третя тенденція – це рух до гіперперсоналізації в індустрії гостинності. Готелі все більше використовують Big Data (великі обсяги даних) для створення персоналізованого досвіду для гостей, спираючись на минулі звички перегляду чи купівлі, а також відомі переваги, щоб створювати індивідуальні пропозиції та послуги.

І четверта тенденція, яку би хотілося зазначити, – це усвідомлення цінності здоров'я та благополуччя. З точки зору гостинності, це означає, що заклади гостинності, повинні не лише дотримуватися стандартів (щодо чистоти, зручностей), але й більше інвестувати в такі зручності, як спа-центри, технології діагностики здоров'я, індивідуальні плани лікування, спрямовані на управління стресом, емоційну рівновагу та покращення сну і т.п.

Привабливість об'єктів гостинності, як з точки зору споживача, так і з точки зору інвестора, залежить від якості послуг, що ними надаються та системи управління об'єктом. Забезпечують та гарантують високій рівень складових – системи стандартизації та сертифікації різних рівнів.

ESG (Environmental, Social and Governance – інвестиції в екологічні, соціальні та управлінські аспекти) та сталий розвиток – це не лише тенденції 2023 року, це головні чинники, що мають формувати мислення учасників галузі гостинності на подальші роки.

Згідно з Директивою ЄС про звітність щодо сталого розвитку підприємств (ESRD), компанії, які класифікуються як «великі», повинні будуть звітувати про свою практику ESG з 2025 року, починаючи з 2024 фінансового року. Це включає дочірні компанії деяких організацій, що не входять до ЄС, і, згодом, законодавство має поширюватися на менші підприємства, що працюють в ЄС, незалежно від того, де вони розташовані [7].

ESRS (European Sustainability Reporting Standards) – Європейські стандарти звітності про сталий розвиток надають компаніям основу для звітності з екологічних, соціальних та питань стійкості управління (ESG).

Інформація, розкрита відповідно до ESRS, дає змогу користувачам звітності зрозуміти суттєвий вплив підприємства на людей і навколишнє середовище, а також суттєвий вплив питань сталого розвитку на розвиток, результативність і становище підприємства в майбутньому. Мета цього стандарту (ESRS) полягає в тому, щоб забезпечити розуміння архітектури ESRS, умов оформлення та основних концепцій, що використовуються, а також загальних вимог до підготовки та представлення інформації щодо сталого розвитку відповідно до Директиви 2013/34/ЄС з поправками, що внесені Директивою (ЄС) 2022/246 [8].

Є три категорії ESRS: наскрізні стандарти; тематичні стандарти (екологічні, соціальні та управлінські стандарти); галузеві стандарти.

Структура заяви про стійкість ESRS наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

Структура заяви про стійкість ESRS

Частина управлінського звіту	Кодифікація ЄСРС	Назва
1. Загальні відомості	ESRS 2	Загальні відомості про підприємство
2. Екологічна інформація	Не застосовується	Розкриття інформації відповідно до статті 8 Регламенту (ЄС) 2020/852 (Положення про таксономію)
	ESRS E1	Зміна клімату
	ESRS E2	Забруднення
	ESRS E3	Водні та морські ресурси
	ESRS E4	Біорізноманіття та екосистеми
	ESRS E5	Використання ресурсів і циркулярна економіка
3. Соціальна інформація	ESRS S1	Власна робоча сила
	ESRS S2	Працівники в ланцюжку вартості
	ESRS S3	Постраждалі громади
	ESRS S4	Споживачі та кінцеві користувачі
4. Інформація про управління	ESRS G1	Ведення бізнесу

Джерело: [9].

Наскрізні стандарти не залежать від сектору, тобто вони застосовуються до всіх підприємств, незалежно від того, в якому секторі або секторах підприємство працює.

ESRS 2 встановлює вимоги до розкриття інформації, яку підприємство повинно надавати на загальному рівні щодо всіх суттєвих питань сталого розвитку щодо сфер звітності, управління, стратегії, впливу, управління ризиками та можливостями, а також показників і цілей.

Тематичні показники ESRS охоплюють тему сталого розвитку та структуровані на теми й підтеми, а за потреби – ще й на другий рівень підтем.

Галузеві (секторальні) стандарти застосовуються до всіх підприємств у галузі. Вони стосуються впливу, ризиків і можливостей, які, ймовірно, будуть суттєвими для всіх підприємств у певному секторі та які не охоплені, або недостатньо охоплюються актуальними стандартами. Секторальні стандарти є багатотематичними, до них входять теми, що найбільше стосуються відповідної галузі.

На додаток до вимог, викладених у трьох категоріях ESRS, коли підприємство робить висновок, що вплив, ризик або можливість не охоплені, або недостатньо детально охоплені ESRS, але є суттєвими через свої конкретні факти та обставини, підприємство має надавати додаткові відомості

Звісно, що приклад стандартизації закладів гостинності не обмежується Європейським регіоном. Hotel Sustainability Basics – це всесвітньо визнаний і скоординований набір індикаторів сталого розвитку, який мають впроваджувати всі готелі. Стандарт представляє 12 позицій, які є фундаментальними для сталого розвитку готелю та включає три напрями: ефективність, планета та люди. WTTC закликає зацікавлені сторони напрямків і закладів розміщення в усьому світі запроваджувати критерії та підвищити планку стійкості в цьому секторі.

Дотримання всіх вимог індикаторів Hotel Sustainability Basics потребує часу та зусиль для впровадження, особливо в готелях, які починають свій шлях до сталого розвитку, саме тому передбачено впровадження 8 критеріїв протягом першого року, а решта 4 – до третього року від початку проходження перевірки. Принципи гнучкості працюють і в системі стандартизації та дозволяють підприємствам обирати комбінацію критеріїв оцінки на перший рік та надалі.

Hotel Sustainability Basics узгоджено з декількома національними та міжнародними визнаними схемами, що дозволяє готелям приймати ці схеми, як частину свого шляху до сталого розвитку.

Галузеві критерії GSTC (Глобальна рада сталого туризму) (рис. 1) були створені з метою досягнення спільного розуміння сталого туризму та є мінімумом, до якого повинні прагнути готелі (або інші види розміщення). Сертифікація акредитованим органом за цими показниками означає, що ваш продукт чи послуга відповідають найвищим соціальним та екологічним стандартам на ринку.



Рис. 1. Галузеві критерії GSTC

Джерело: сформоване авторами на основі [10]

Підприємства, сертифіковані акредитованим органом сертифікації GSTC, що відповідають усім критеріям GSTC (або стандарту, визнаному GSTC), мають найвищий доступний рівень гарантій і довіри. Завдяки акредитованій сертифікації клієнти та покупці мають впевненість у тому, що бізнес сертифіковано за надійно перевіреною процедурою в прозорий, неупереджений та компетентний спосіб.

Актуальність таких стандартів підтримується й вимогами споживачів. Навіть сьогодні дослідження показують, що 39% споживачів готові платити більше за стійкий досвід та 43% за екологічні подорожі. Лише покоління Z має 140 трильйонів доларів споживчої спроможності, і вони заявляють про бажання витратити їх на стійкий та унікальний досвід [11].

Звіт Booking.com про сталий розвиток подорожей за 2023 рік містить інформацію, зібрану від понад 33 000 мандрівників із 35 країн і територій, яка висвітлює дилему, коли люди відчувають себе потенційно

змушеними вибирати між скороченням витрат і більшою уважністю щодо вибору більш екологічних подорожей. 76% глобальних мандрівників кажуть, що вони хочуть подорожувати більш екологічно протягом наступних 12 місяців, що на 16% більше, ніж аналогічний показник за 2021 рік, і на 5% більше, ніж за 2022 рік.

Майже половина мандрівників (49%) шукають пропозиції зі знижками та економічних стимулів, щоб вибрати екологічно чисті варіанти (зростання на 12% порівняно з 2022 роком), тоді як 42% готові подорожувати більш екологічно за допомогою нарахування балів, які вони могли б використати для безкоштовні додаткові пільги або знижки на сайтах онлайн-бронювання подорожей [12].

Прикладом слідування сучасних тенденцій може бути готель Ritz-Carlton, Grand Cayman, розташований на знаменитому пляжі Севен-Майл, що пропонує своїм гостям неперевершену розкіш, поєднану з твердою прихильністю до екологічної стійкості. Курорт, перший і єдиний об'єкт у Карибському басейні, який отримав п'ять зірок (переможець п'ятизіркового путівника Forbes) [13]. Сімейна програма «Посли навколишнього середовища» (Ambassadors of the Environment), розроблена легендарним Жаном-Мішелем Кусто, використовує сімейні заходи, щоб познайомити гостей із природними чудесами та культурними традиціями Кайманових островів.

Згідно з даними компанії STR Inc., яка надає дані про світову готельну індустрію, середня добова плата за готелі в цьому пункті призначення зросла на 12% у порівнянні з 2019 роком. Круїзні лайнери повернулися на Кайманові острови в березні 2022 року, а до грудня 2022 року пункт призначення прийняв 743 394 круїзних пасажирів на 261 судні [14, 15].

Готель також прагне збільшувати залучення персоналу через програму REACT (The Ritz-Carlton Environmental Action Conservation Team). Раз на місяць співробітників запрошують приєднатися до панелі, метою якої є обговорення, оцінка та надання відгуків щодо екологічних та соціокультурних проектів. Таким чином, курорт забезпечує ширше охоплення громади та інтеграцію ідей персоналу в стратегії стійкого розвитку Ritz-Carlton. Просвітницькі ініціативи та дні дій використовуються для сприяння відповідальній поведінці, наприклад «День без сміття», який заохочує мінімізувати харчові відходи серед персоналу [14, 16].

Сертифікація ISO 22000 – це всесвітньо визнаний стандарт, який використовується для впровадження системи управління безпечністю харчових продуктів (FSMS).

Стандарти ISO для індустрії гостинності містять вимоги до стандартизованої системи менеджменту, яка підтримуватиме послідовність у наданні якісних продуктів і послуг для клієнтів. Стандарти ISO для готельної індустрії також дуже продуктивні для задоволення потреб і очікувань клієнтів. Таким чином, сертифікати ISO є дуже корисними для готельної, ресторанної та індустрії послуг для відпочинку.

Сертифікація ISO може допомогти закладам гостинності підняти свій бізнес на світовому ринку:

- сертифікація ISO допомагає закладам підтримувати заходи з охорони навколишнього середовища, здоров'я та безпеки, зменшувати ризики, пов'язані з роботою та екологічними загрозами;
- сертифікація ISO для бізнесу гостинності допомагає створити основу для ефективної та дієвої доставки продуктів і послуг, приділяє значну увагу збалансованому використанню енергії, заохочуючи економію коштів в організації;
- стандарт ISO оцінює та визначає всі ризики, пов'язані з робочими процесами, і знаходить спосіб їх пом'якшення для організації;
- сертифікація ISO для готелів, ресторанів і індустрії дозвілля оптимізує реконструкцію процесів в організації, що, в свою чергу, стимулює економію коштів.

Найпоширеніші стандарти ISO, які застосовуються в індустрії гостинності:

Стандарт ISO 9001: Система управління якістю; Стандарт ISO 14001: Система управління навколишнім середовищем; Стандарт ISO 45001: Система управління охороною праці та безпекою; Стандарт ISO 50001: Система управління енергією;

Стандарт ISO 22000: Система управління безпечністю харчових продуктів; Стандарт SOC: Системні та організаційні засоби контролю; Стандарт GDPR: Загальний регламент захисту даних; Стандарт ISO 27701: Система управління конфіденційною інформацією (PIMS).

Сертифікація ISO 9001 є найбільш необхідним стандартом, що забезпечує основу для впровадження системи управління якістю (QMS) в закладі. Він гарантує, що якість продуктів, послуг, які надає фірма, а також процесів, що відбуваються в організації, відповідають міжнародним стандартам.

ISO 14001 – стандарт, який спеціально розроблений для впровадження систем управління навколишнім середовищем (EMS) в готелі. Цей стандарт допомагає перевіряти всі дії, які негативно впливають на навколишнє середовище, тим самим формуючи репутацію закладу, що опікується проблемами навколишнього середовища.

ISO 45001 – стандарт, який забезпечує основу для впровадження системи управління охороною здоров'я та безпеки праці (OHSMS) на підприємстві. Цей стандарт гарантує безпеку персоналу та гостей від будь-яких професійних ризиків або травм.

ISO 22000 – стандарт, який використовується для впровадження системи управління безпечністю харчових продуктів (FSMS). Він гарантує, що їжа чи будь-які інші споживчі матеріали, які заклад пропонує клієнтам, мають найкращу якість та є абсолютно безпечними та здоровими.

ISO 50001 – стандарт, який використовується для впровадження систем управління енергією (EMS). За допомогою даного стандарту можна оптимізувати кількість енергії, яка використовується [16].

З 1993 року Україна стала повноважним членом Міжнародної організації зі стандартизації (ISO) та Міжнародної електротехнічної комісії (IEC), член-кореспондент Міжнародної організації законодавчої метрології, Європейського комітету зі стандартизації, член Міжнародної інформаційної мережі, та приєдналася до Кодексу добросовісної практики щодо розроблення та використання стандартів Європейського комітету зі стандартизації тощо. Наша держава взяла на себе зобов'язання щодо наближення законодавства та гармонізації стандартів, норм, правил і сертифікації до європейських, у рамках договору з Європейським Союзом. Для цього розробляється та реалізується багато державних і галузевих програм зі стандартизації, які, в свою чергу, стимулюють іноземні інвестиції, підвищують конкурентоспроможність української продукції. Що стосується категоризації готелів, то ще й сьогодні вітчизняна система не відповідає в повній мірі європейській, чи світовій.

Членство в європейських галузевих організаціях HOTREC і HSU Україна здобула в 2021 році. Для готельного бізнесу це означало курс на оновлення законодавчої бази відповідно до стандартів ЄС та впровадження європейських практик контролю учасників ринку.

Державне агентство розвитку туризму України в 2022 році спільно з Асоціацією готелів і курортів України (UHRA) провели анонімне опитування, згідно з яким 81% респондентів вважають, що українські стандарти застаріли та не враховують потреби потенційних клієнтів, а 58% наголосили на необхідності запровадження в систему європейських стандартів категоризації. Водночас, за результатами опитування, 61% українських готелів не мають встановленої категорії, що, в свою чергу, впливає на якість готельних послуг і робить вітчизняний ринок ще більш вразливим. Тому, подальше впровадження європейських підходів до класифікації та категоризації готелів, уніфікації стандартів та вдосконалення досвіду споживачі готельного продукту є першочерговим для ринку гостинності в Україні, залучення інвестицій до вітчизняних закладів гостинності [17].

В Україні під час війни продовжують функціонувати мережеві готельні бренди як під управлінням міжнародних операторів («Radisson», «Hyatt», «InterContinental», «Accor», «Wyndham», «Hilton», «Rixwell»), так і під управлінням національних («Optima Hotels», «Ribas Hotels», «Premier Hotels», «Senator Hotels», «Vertex Hotel Group»).

Ринкова частка готельних операторів (міжнародних та національних) за кількістю мережевих готелів зображено на рисунку 2.

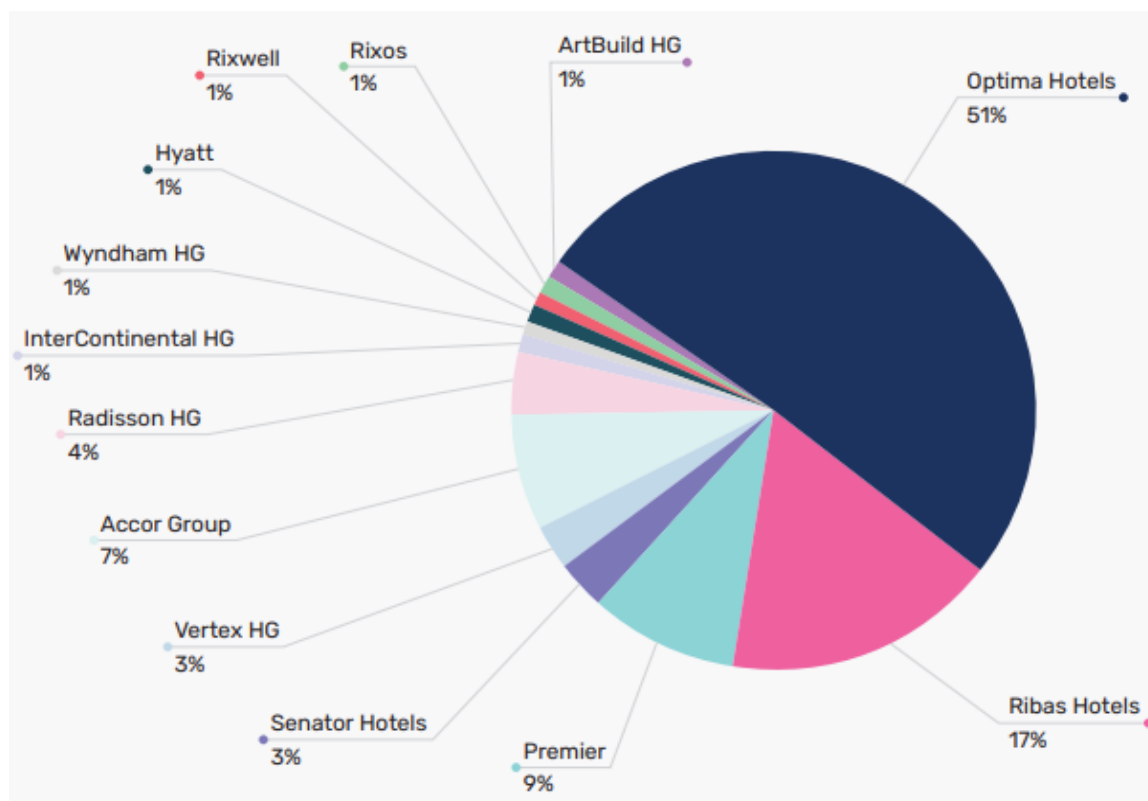


Рис. 2. Частка готельних операторів (міжнародних та національних) на українському ринку гостинності

Джерело: [18]

За кількістю готелів в Україні провідне місце займають мережі:

- «Optima Hotels» (64 готелі);
- «Ribas Hotels» (20 готелів);
- «Premier Hotels and Resorts» (11 готелів);
- «Accor» (9 готелів);
- «Radisson» (5 готелів).

Міжнародне проникнення в регіони: серед наявних 22 транснаціональних готелів в м.Київ розташовані 14 (або 64%), м.Львів – 4 (або 18%), м.Одеса – 2 (або 9%), м. Трускавець – 1 (4,5%), курорт Буковель – 1 (4,5%).

Частина готелів відмовилася від іноземного управління («Aloft», «Four Points By Sheraton Zaporozhye» від «Marriott», «Брістоль Одеса» від «Starwood Hotels»). Розвиток національних операторів активніше націлений на регіони (обласні центри та популярні зони відпочинку та рекреації). Деякі українські готельні мережі розпочали розвиток на міжнародних ринках «Reikartz» (Казахстан, Узбекистан, Грузія), «Premier Hotels» (Угорщина), «Ribas Hotels» (Індонезія, Польща, Молдова).

Висновки та перспективи. В перспективі передбачається, що на готельному ринку України на 2024-2026 роки заплановано реалізацію 45 нових проектів готельно-апартаментних комплексів і 108 котеджних містечок готельного типу. В найближчі два роки заявлене поповнення номерного фонду становить для готелів та апартаментів – 6670 номерів, для котеджних містечок – 3097 будинків [18].

Після закінчення війни, аналітики прогнозують зростання туристичного потоку до України до 14,5 млн осіб. Таким чином, нинішній обсяг номерного фонду не зможе відповідати попиту, а потенційна потреба в номерному фонді може становити +30-40% від нинішньої кількості. Це повинно бути сигналом для влади та наукової спільноти, щоб вже сьогодні активізувати роботи щодо посилення конкурентоздатності та інвестиційної привабливості українського ринку гостинності.

Долучення до міжнародних систем стандартизації та подальша активна гармонізація національної системи стандартів дозволить учасникам вітчизняного готельно-ресторанного бізнесу залучати іноземні інвестиції на становлення вітчизняного ринку. Отримання українськими готелями сертифікатів якості міжнародного рівня, категорій за міжнародними вимогами, стане свідченням для внутрішніх та закордонних учасників ринку прагнення закладу до сталого розвитку та перспективності вкладення коштів.

Список використаних джерел:

1. Галасюк С.С., Демянчу К.Ф. Категоризація готелів України в контексті європейського досвіду. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2018. № 32. С. 64–68.
2. Грабар М. В. Категоризація готелів в Україні: регіональний аспект. *Економіка. Фінанси. Право*. 2018. № 4. С. 40–44.
3. Управління розвитком туризму та гостинності на основі співпраці з міжнародними організаціями / за ред. І. Л. Сазонця. Дніпро: ВВПЗ ДГУ, 2023. 213 с.
4. Терещук Н.В. Вплив екологічної сертифікації на рейтинг готелів з боку клієнтів. *Інфраструктура ринку*. 2022. № 65. Режим доступу: <http://www.marketinfr.od.ua/uk/65-2/>
5. Bondar I., Shchokholieva I., Sokolovskiy V., Maliuga L., Tereshchuk N. Prerequisites for the ecologization of recreational and tourist activities in Ukraine. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science this link is disabled, 2023, 1126(1). Режим доступу: <https://lib.udau.edu.ua/handle/123456789/9940>
6. Шикіна О.В. Сучасні тенденції розвитку категорійних готелів України. Вісник соціально-економічних досліджень. *Економіка туризму та готельно-ресторанна справа*. 2021. № 2 (77). DOI: 10.33987/vsed.2(77).2021.163-179
7. Slors A. Hotel industry trends and developments for 2024. Glion Institute of Higher Education. Режим доступу: <https://www.glion.edu/magazine/hotel-industry-trends-and-developments-for-2024/>
8. Commission delegated regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU of the European Parliament and of the Council as regards sustainability reporting standards. Режим доступу: Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU as regards sustainability reporting standards
9. Додаток Д. Commission delegated regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU of the European Parliament and of the Council as regards sustainability reporting standards. Режим доступу: Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU as regards sustainability reporting standards
10. Hotel Sustainability Basics. Режим доступу: <https://wtcc.org/initiatives/hotel-sustainability-basics>
11. Booking.com 2023 Sustainable Travel Report. Режим доступу: Booking.com 2023 Sustainable Travel Report
12. Kester J. The Cayman Islands' Only Five-Star Hotel Is Back After A Massive Renovation. *Forbes*. Режим доступу: <https://www.forbes.com/sites/forbestravelguide/2022/07/08/the-cayman-islands-only-five-star-hotel-is-back-after-a-massive-renovation/>

-
13. Joe Pike Cayman Islands Tourism Is Sizzling. April 11, 2023. Режим доступу: <https://www.caribjournal.com/news/>
 14. The Global Sustainable Tourism Council (GSTC). Режим доступу: <https://www.gstcouncil.org>
 15. The Ritz-Carlton, Grand Cayman. Режим доступу: <https://www.ritzcarlton.com/en/hotels>
 16. ISO. Режим доступу: <https://www.siscertifications.com/iso-certification-hotel-restaurant-and-leisure-service/>
 17. Державне агентство розвитку туризму в Україні. Режим доступу: <https://www.tourism.gov.ua/>
 18. Огляд готельного ринку 2024. Ribas Hotels Group. Режим доступу: <https://ribashotelsgroup.ua/>

References:

1. Halasiuk, S. S., Demianchu K. F. (2018). Katehoryzatsiia hoteliv Ukrainy v konteksti yevropeiskoho dosvidu. *Naukovyi visnyk Khersonskoho derzhavnoho universytetu. Seriia «Ekonomichni nauky»*, (32), 64–68.
2. Hrabar, M. V. (2018). Katehoryzatsiia hoteliv v Ukraini: rehionalnyi aspekt. *Ekonomika. Finansy. Pravo*, (4), 40–44.
3. *Upravlinnia rozvytkom turyzmu ta hostynnosti na osnovi spivpratsi z mizhnarodnymy orhanizatsiiamy*. (2023). (I. L. Sazonts, Ed.). Dnipro : VNPZ DHU.
4. Tereshchuk, N. V. (2022). Vplyv ekolohichnoi sertyfikatsii na reitynh hoteliv z boku kliientiv. *Ekonomika pryrodokorystuvannia ta okhorony navkolyshnoho seredovyscha. Infrastruktura rynku*. (65), 133-137. <https://doi.org/10.32843/infrastruct65-23>.
5. Bondar, I., Shchoholieva, I., Sokolovskiy, V., Maliuga, L. & Tereshchuk, N. (2023). Prerequisites for the ecologization of recreational and tourist activities in Ukraine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* link is disabled. (1126(1)), 1-12. <https://lib.udau.edu.ua/handle/123456789/9940>
6. Shykina, O. V. (2021). Suchasni tendentsii rozvytku katehoriinykh hoteliv Ukrainy. *Visnyk sotsialno-ekonomichnykh doslidzhen. Ekonomika turyzmu ta hotelno-restoranna sprava*. (2 (77)), 163-179. DOI: 10.33987/vsed.2(77).2021.163-179
7. Slors, A. (2024). Hotel industry trends and developments for 2024. Glion Institute of Higher Education. Режим доступу: <https://www.glion.edu/magazine/hotel-industry-trends-and-developments-for-2024/>
8. Commission delegated regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU of the European Parliament and of the Council as regards sustainability reporting standards. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:32023R2772/>
9. Commission delegated regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU of the European Parliament and of the Council as regards sustainability reporting standards. Addition D. Commission Delegated Regulation (EU) 2023/2772 of 31 July 2023 supplementing Directive 2013/34/EU as regards sustainability reporting standards.
10. Hotel Sustainability Basics. <https://wtcc.org/initiatives/hotel-sustainability-basics>
11. Booking.com (2023) Sustainable Travel Report. Booking.com 2023 Sustainable Travel Report.
12. Kester, J. The Cayman Islands Only Five-Star Hotel Is Back After A Massive Renovation. Forbes. <https://www.forbes.com/sites/forbestravelguide/2022/07/08/the-cayman-islands-only-five-star-hotel-is-back-after-a-massive-renovation/>
13. Pike, J. Cayman Islands Tourism Is Sizzling. April 11, 2023. <https://www.caribjournal.com/2021/12/19/ritz-carlton-grand-cayman-resort-newly-renovated-reopens/>
14. The Global Sustainable Tourism Council (GSTC). <https://www.gstcouncil.org>.
15. The Ritz-Carlton, Grand Cayman. <https://www.ritzcarlton.com/en/hotels>
16. ISO. <https://www.siscertifications.com/iso-certification-hotel-restaurant-and-leisure-service/>
17. The State Agency for Tourism Development of Ukraine. <https://www.tourism.gov.ua/>
18. Ohliad hotelnoho rynku 2024. Ribas Hotels Group. <https://ribashotelsgroup.ua/>

Погребняк А. В., доктор технічних наук, професор
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-3214-6410

Кучер М. М., кандидат економічних наук, доцент
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-3214-6410

Сабіров О. В., кандидат технічних наук, доцент
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-3214-6410

Гриценко А. В., кандидат економічних наук
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-8986-0714

Зінченко Г. К., доктор філософії
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0009-0005-1895-5977

ІНТЕГРАЦІЙНИЙ ПІДХІД ДО ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ У ПРОЄКТУВАННІ ТА БУДІВНИЦТВІ ОБ'ЄКТІВ ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННОГО БІЗНЕСУ

У статті досліджується вплив архітектурних рішень на енергоефективність об'єктів готельно-ресторанного бізнесу. Особлива увага приділяється питанням вибору матеріалів, орієнтації будівель, конструктивним рішенням, системам вентиляції та освітлення, а також інтеграції відновлюваних джерел енергії. Представлено аналіз сучасних архітектурних підходів, що сприяють зниженню енергоспоживання та забезпечують сталість готельно-ресторанного бізнесу.

Метою статті є дослідження аспектів впливу архітектурних рішень у проєктуванні та будівництві закладів готельно-ресторанного бізнесу на їх енергоефективність.

Надано характеристику впливу зовнішніх факторів території розміщення закладу та його орієнтації відносно сторін світу. Визначено конструктивні можливості зменшення тепловтрат. Проведено аналіз систем вентиляції та кондиціонування приміщень. Наведено приклади використання відновлюваних енергетичних джерел. Доведено переваги автоматизації системи управління будівлею. Визначено роль якості системи освітлення у підвищенні енергоефективності. Проведено аналіз використання екологічно чистих матеріалів. Охарактеризовано сучасні енергозберігаючі технології та інноваційні матеріали. Проведено аналіз впливу енергоефективності на прибутковість бізнесу. Надано рекомендації щодо можливості підвищення енергоефективності та оптимізації енергоспоживання шляхом впровадження запропонованих архітектурних рішень як у процесі проєктування закладів сфери гостинності, так і під час їх будівництва.

Результати дослідження підкреслюють важливість інтеграції енергоефективних технологій на ранніх стадіях проєктування та в процесі експлуатації будівель.

Ключові слова: енергоспоживання, енергозбереження, енергоефективність, архітектурні рішення, інноваційні технології, інфраструктурна мережа, готельно-ресторанний бізнес.

Pogrebnyak A. V., Kucher M. M., Sabirov O. V., Grytsenko A. V., Zinchenko H. K. Integrated approach to energy efficiency in design and construction of hotel and restaurant business objects

The article examines the impact of architectural solutions on the energy efficiency of hotel and restaurant business facilities. Particular attention is paid to the choice of materials, buildings orientation, constructive solutions, ventilation and lighting systems, and the integration of renewable energy sources. The analysis of modern architectural approaches that help reduce energy consumption and ensure the sustainability of the hotel and restaurant business is presented. The results of the study emphasize the importance of integrating energy-efficient technologies in the early stages of design and during the operation of buildings.

The paper considers the main architectural aspects that affect the energy efficiency of hotels and restaurants and provides examples of modern solutions that allow for achieving high energy efficiency indicators.

The purpose of this study is to investigate the impact of architectural solutions in the design and construction of hotel and restaurant business establishments on their energy efficiency. Based on this, its objectives are as follows: to characterize the impact of external factors of the location area of the establishment and its orientation relative to the cardinal points; to identify constructive opportunities to reduce heat loss; to analyze ventilation and air conditioning systems; to provide examples of the use of renewable energy sources; to prove the benefits of building management system automation; to determine the role of lighting system quality in improving energy efficiency; to analyze the use of environmentally friendly materials; to characterize modern energy-saving technologies and innovative materials; to analyze the impact of energy efficiency on business profitability.

Investments in energy-efficient technologies are often perceived as additional costs that are not always a business priority. However, the long-term perspective shows the opposite: energy efficiency can have a significant impact on the profitability of hotels and restaurants.

Energy-efficient buildings are becoming more attractive to guests who are increasingly paying attention to environmental aspects when choosing a place to stay or eat. The marketing advantage provided by energy efficiency certificates or participation in sustainability programs can be a significant factor in competing in the market.

It is also worth noting that energy efficiency investments often have a short payback period. Due to reduced energy costs, such projects can pay off in 3-7 years, after which the company begins to receive a net profit from the saved funds.

Key words: *energy saving, energy efficiency, architectural solutions, innovative technologies, infrastructure network, hotel and restaurant business.*

Постановка проблеми. У сучасному світі розв'язання проблем енергозбереження та енергоефективності стають одними із ключових факторів, що визначають успішність і сталий розвиток будь-якої галузі економіки, зокрема готельно-ресторанного бізнесу. Це обумовлює актуальність обраної тематики дослідження. Також, не менш важливими та актуальними для готельно-ресторанного бізнесу є економічні та екологічні причини для обрання сучасних архітектурних рішень, які сприятимуть зниженню витрат на енергоспоживання, підвищенню комфорту та безпеки для гостей, а також мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище. Архітектурні рішення, що приймаються на етапі проектування, значною мірою визначають енергетичну ефективність майбутнього закладу готельно-ресторанного господарства. Від оптимального вибору конструктивних матеріалів, планування приміщень до застосування сучасних інженерних систем, залежить не тільки рівень енергоспоживання, але й загальна експлуатаційна ефективність будівлі [1].

Архітектори та інженери стикаються з викликом інтеграції енергоефективних технологій та рішень у свої проекти, що стає можливим завдяки розвитку новітніх технологій, використанню відновлюваних джерел енергії та впровадженню інтелектуальних систем управління закладами готельно-ресторанного бізнесу. У роботі розглянуто основні архітектурні аспекти, що впливають на енергоефективність готелів і ресторанів, та наведено приклади сучасних рішень, які дозволяють досягти високих показників енергоефективності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз існуючих досліджень та публікацій щодо підходів до енергоефективності у проектуванні та будівництві об'єктів готельно-ресторанного бізнесу показав, що даний напрям є наразі недопрацьованим. Дані питання вивчалися Т. Апатенко, В. Язіною, О. Вишнікіною, А. Климчук, І. Левицькою, Г. Тарасюк та іншими.

Мета дослідження. Дослідження аспектів впливу архітектурних рішень у проектуванні та будівництві закладів готельно-ресторанного бізнесу на їх енергоефективність стало метою цієї роботи. Виходячи з чого, її завданнями визначено: надати характеристику впливу зовнішніх факторів території розміщення закладу готельно-ресторанного бізнесу та його орієнтації відносно сторін світу; визначити конструктивні можливості зменшення тепловтрат; провести аналіз систем вентиляції та кондиціонування приміщень; навести приклади використання відновлюваних енергетичних джерел; довести переваги автоматизації системи управління будівлею закладу готельно-ресторанного бізнесу; визначити роль якості системи освітлення у підвищенні енергоефективності; провести аналіз використання екологічно чистих матеріалів; охарактеризувати сучасні енергозберігаючі технології та інноваційні матеріали; провести аналіз впливу енергоефективності на прибутковість готельно-ресторанного бізнесу. У висновках проведеного дослідження надано рекомендації щодо можливості підвищення енергоефективності та оптимізації енергоспоживання шляхом впровадження запропонованих архітектурних рішень як у процесі проектування закладів сфери гостинності, так і під час їх будівництва.

Виклад основного матеріалу дослідження. Архітектурні рішення відіграють ключову роль у визначенні енергетичних показників будівель, зокрема готелів та ресторанів. Перш за все, архітектурні рішення впливають на тепловий баланс будівлі. Наприклад, форма будівлі, площа її зовнішніх поверхонь та їх ізоляційні властивості безпосередньо впливають на рівень тепловтрат і, відповідно, на необхідність додаткового опалення або кондиціонування. Вибір матеріалів для будівництва також значно впливає на енергетичну ефективність будівлі закладу готельно-ресторанного бізнесу. Сучасні матеріали з високими теплоізоляційними характеристиками дозволяють знизити рівень тепловтрат, що позитивно позначається на енергоспоживанні. Використання багатопланових конструкцій стін, даху та підлоги може суттєво знизити рівень теплопередачі, що також сприяє підвищенню енергоефективності будівель закладу готельно-ресторанного бізнесу. Важливою складовою є також врахування властивостей матеріалів, які використовуються для будівлі, оскільки

вікна є значним джерелом тепловтрат. Крім того, на енергетичні показники будівлі впливають її розміщення та орієнтація відносно сторін світу. Правильна орієнтація будівлі може забезпечити максимальне використання сонячного тепла взимку і мінімізувати його вплив влітку, що суттєво знижує потребу в енергії для опалення і кондиціонування. Планування будівлі також повинно враховувати природну вентиляцію, що дозволяє знизити енергоспоживання на кондиціонування повітря. Важливим фактором, що впливає на енергоефективність будівель, є орієнтація будівлі відносно сторін світу та врахування кліматичних умов місцевості. Орієнтація будівлі визначає кількість сонячного світла, яке потрапляє всередину приміщень протягом дня, що, у свою чергу, впливає на рівень енергоспоживання для освітлення та опалення. Наприклад, орієнтація вікон та інших скляних поверхонь на південь дозволяє максимально використовувати сонячне тепло взимку, що зменшує потребу в додатковому опаленні. Водночас влітку може виникнути необхідність у використанні сонцезахисних елементів, таких як жалюзі або навіси, для запобігання перегріву приміщень закладів готельно-ресторанного бізнесу.

Очевидно, що планування будівлі повинно враховувати місцеві кліматичні умови, такі як вітрові навантаження, рівень опадів, середньорічні температури тощо. У регіонах з високою температурою влітку варто передбачити використання матеріалів та конструкцій, що знижують рівень теплопередачі, а також застосування природної вентиляції для охолодження приміщень. У холодних кліматичних зонах особливу увагу слід приділяти теплоізоляції та мінімізації тепловтрат [1,5]. Зниження тепловтрат є одним із ключових аспектів енергоефективного будівництва. Основними конструктивними елементами, що впливають на рівень тепловтрат, є стіни, дах, підлога та вікна. Використання сучасних теплоізоляційних матеріалів, таких як екструдований полістирол, мінеральна вата або піноскло, дозволяє значно знизити теплопередачу через ці елементи. Особливу увагу слід приділяти утепленню даху та підлоги, оскільки саме через ці частини будівлі часто відбуваються найбільші втрати тепла. Багатошарові конструкції, що включають теплоізоляційні та пароізоляційні шари, дозволяють не тільки знизити тепловтрати, але й забезпечити комфортні умови в приміщенні незалежно від зовнішніх температур. Вікна та двері є ще одним важливим джерелом тепловтрат. Сучасні віконні системи з подвійним або потрійним склінням, заповнені інертним газом, значно знижують рівень теплопередачі. Крім того, використання спеціальних енергозберігаючих покриттів на склі дозволяє зменшити втрати тепла в холодний період і перегрів влітку. У табл. 1 представлено порівняльні показники кількох видів теплоізоляційних матеріалів, що наразі пропонує сучасний будівельний ринок [1, 5].

Таблиця 1

Порівняння характеристик теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	Теплопровідність (Вт/м ² К)	Вага (кг/м ³)	Вартість (\$/м ²)	Термін експлуатації (роки)
Мінеральна вата	0.036	100-200	10-15	30-50
Екструдований пінополістирол (XPS)	0.030	35-45	15-20	50-75
Поліуретанова піна	0.025	30-40	20-25	30-50
Скловата	0.040	25-35	8-12	30-40

Енергоефективні системи вентиляції та кондиціонування повітря також відіграють важливу роль у забезпеченні комфортного мікроклімату в готелях і ресторанах. Сучасні вентиляційні системи дозволяють забезпечити ефективний обмін повітря без втрат тепла, що досягається завдяки використанню рекуператорів – пристроїв, що дозволяють передавати тепло від витяжного повітря до припливного [1]. Природна вентиляція, що забезпечується через вікна, вентиляційні канали та інші отвори, також є важливим елементом енергоефективного проєктування. Вона дозволяє знизити навантаження на системи кондиціонування та забезпечити охолодження приміщень у теплу пору року.

Інтелектуальні системи управління кліматом, що використовують датчики температури, вологості та якості повітря, дозволяють автоматично регулювати параметри внутрішнього мікроклімату, знижуючи споживання енергії. Такі системи можуть автоматично включати або вимикати вентиляцію, кондиціонування та опалення залежно від поточних умов у приміщенні, що дозволяє підтримувати комфортні умови з мінімальними витратами енергії. Системи кондиціонування, що використовують теплові насоси, також є енергоефективним рішенням для готелів і ресторанів. Вони можуть працювати як на охолодження, так і на обігрів приміщень, використовуючи при цьому мінімальну кількість електроенергії. Використання гібридних систем, які комбінують різні джерела енергії, дозволяє досягти ще вищих показників енергоефективності. Інтеграція відновлюваних джерел енергії в архітектурні проєкти готелів і ресторанів дозволяє значно знизити їх енергоспоживання та залежність від традиційних джерел енергії. Серед найпоширеніших рішень – використання сонячних панелей, вітрових турбін та геотермальних систем [2, 3].

Встановлення сонячних панелей на дахах або фасадах будівель дозволяє забезпечити об'єкти власною електроенергією, знижуючи залежність від традиційних енергоресурсів. Крім того, такі рішення мають

позитивний вплив на екологічний імідж закладів готельно-ресторанного бізнесу, що є важливим чинником у конкурентній боротьбі. Сонячні панелі є одним із найефективніших рішень для готелів і ресторанів, розташованих у регіонах з високою сонячною активністю. Вони можуть бути інтегровані в конструкцію даху або фасаду будівлі, забезпечуючи вироблення електроенергії для потреб будівлі. Використання сонячної енергії для підігріву води також є ефективним рішенням, що дозволяє знизити витрати на гаряче водопостачання [1, 4]. Табл. 2 демонструє показники ефективності сучасних сонячних панелей [1, 4].

Таблиця 2

Ефективність різних типів сонячних панелей

Тип панелей	ККД (%)	Вартість встановлення (\$ кВт)	Термін експлуатації (роки)	Кількість енергії, що виробляється (кВт-год/м ² на рік)
Монокристалічні	18-22	1000-1500	25-30	150-220
Полікристалічні	15-17	800-1200	20-25	130-180
Тонкоплівкові	10-12	600-800	15-20	100-140

Вітрові турбіни також можуть бути ефективним рішенням для готелів і ресторанів, розташованих у регіонах з постійними вітрами. Хоча вітрова енергія менш передбачувана, ніж сонячна, вона може стати важливим додатковим джерелом енергії. Геотермальні системи, що використовують тепло землі для обігріву або охолодження приміщень, є ще одним ефективним рішенням для підвищення енергоефективності будівель. Вони забезпечують стабільну роботу протягом усього року, незалежно від погодних умов, і можуть бути інтегровані в системи опалення та кондиціонування.

Інтелектуальні системи управління будівлею (Building Management Systems, BMS) дозволяють оптимізувати споживання енергії завдяки автоматизації процесів управління освітленням, опаленням, вентиляцією та кондиціонуванням. Вони можуть інтегрувати дані з різних датчиків та систем будівлі для прийняття оптимальних рішень щодо енерговикористання [3]. BMS дозволяють автоматично регулювати освітлення залежно від природного світла, що потрапляє до приміщення, або ж за наявності людей у приміщенні. Це знижує споживання електроенергії, підвищуючи при цьому комфорт для гостей. Системи автоматизації також можуть забезпечити ефективне управління системами опалення та кондиціонування, підтримуючи оптимальний мікроклімат в приміщенні та знижуючи витрати на енергію. Вони можуть адаптувати свою роботу залежно від зовнішніх погодних умов, прогнозу погоди та інших факторів, забезпечуючи максимальну ефективність. З табл. 3 видно наявні переваги використання BMS-системи управління як у питаннях енергоефективності та зменшення витрат на опалення, так і на стан комфортності перебування гостей в готелі [3, 4].

Таблиця 3

Порівняння показників енергоефективності готелів із застосуванням BMS та без них

Показник	Готель з BMS	Готель без BMS
Споживання електроенергії	30% зниження	Без змін
Витрати на опалення	25% зниження	Без змін
Комфорт для гостей	Підвищений	Середній
Окупність інвестицій	5 років	Без окупності

Екологічно чисті будівельні матеріали не лише сприяють зниженню негативного впливу на навколишнє середовище, але й можуть покращити енергоефективність будівель. Такі матеріали, як, наприклад, натуральне дерево, глина, пінобетон або перліт, мають високі теплоізоляційні властивості, що дозволяє зменшити витрати на опалення та кондиціонування [3, 4].

Використання матеріалів з високою теплоємністю, таких як бетон або камінь, дозволяє акумулювати тепло впродовж дня та поступово віддавати його вночі, що забезпечує стабільний температурний режим у приміщенні. У табл. 4 представлено переваги використання природних матеріалів у будівництві за показниками енергоефективності [3, 4]. Вибір матеріалів також впливає на внутрішній мікроклімат приміщень. Матеріали, що дихають, такі як глина або натуральне дерево, здатні регулювати вологість у приміщенні, що сприяє створенню комфортних умов для перебування людей та знижує потребу в додаткових системах кондиціонування.

Розвиток енергозберігаючих технологій відкриває нові можливості для підвищення енергоефективності готелів та ресторанів. Одним із прикладів таких технологій є використання систем теплового акумулювання, що дозволяють зберігати надлишкове тепло для подальшого використання в опалювальних або гарячих водопостачальних системах. Іншою інновацією є використання фазоперехідних матеріалів (PCM), які здатні зберігати та віддавати тепло під час зміни агрегатного стану. Такі матеріали можуть бути

інтегровані в конструкцію стін або стелі, забезпечуючи стабільну температуру в приміщенні без використання додаткової енергії [1–5]. Застосування енергозберігаючих можливостей скла також є важливим елементом сучасного будівництва. Скло з низьким коефіцієнтом теплопередачі дозволяє знизити втрати тепла через вікна, що є однією з головних проблем у старих будівлях. Сучасні віконні системи з подвійним або потрійним склопакетом і спеціальними покриттями значно підвищують енергоефективність будівель закладів готельно-ресторанного бізнесу. Крім того, технології «розумних» вікон, що здатні змінювати свою прозорість залежно від зовнішніх умов, дозволяють контролювати кількість сонячного світла, яке потрапляє в приміщення, і таким чином знижувати навантаження на системи кондиціонування [2, 3, 4].

Таблиця 4

Порівняння впливу будівельних матеріалів на показники енергоефективності

Матеріал	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Вплив на енергоефективність
Натуральне дерево	0.13	Високий
Глина	0.15	Високий
Пінобетон	0.04	Дуже високий
Бетон	1.7	Низький

Наразі, у архітектурному плануванні та будівництві вже широко використовуються архітектурні рішення, пов'язані із впровадженням «зелених» технологій [3]. «Зелені» дахи та вертикальні сади – це архітектурні рішення, які не лише покращують зовнішній вигляд будівлі, але й сприяють підвищенню її енергоефективності. Такі дахи знижують тепловтрати взимку та захищають будівлю від перегріву влітку. Крім того, вони поглинають дощову воду, що знижує навантаження на системи водовідведення. У табл. 5 представлено порівняння різних типів «зелених» дахів [2, 3, 4].

Таблиця 5

Порівняння характеристик різних типів зелених дахів

Тип даху	Вартість встановлення (\$/м²)	Теплопровідність (Вт/м²К)	Термін експлуатації (роки)	Вага (кг/м²)
Екстенсивний	50-100	0.30	30-50	60-150
Інтенсивний	150-300	0.15	40-60	200-500

Інженерні системи є невід'ємною частиною будь-якої будівлі, і їх ефективність значною мірою впливає на загальну енергоефективність. Системи вентиляції, опалення, кондиціонування повітря (HVAC), водопостачання та освітлення – усі ці системи повинні бути спроектовані таким чином, щоб мінімізувати споживання енергії без шкоди для комфорту користувачів [1, 5]. Ефективність систем HVAC визначається не лише типом обладнання, але й тим, наскільки добре ці системи інтегровані в загальний архітектурний план будівлі. Наприклад, використання систем рекуперації тепла дозволяє знизити витрати на опалення та охолодження, зберігаючи при цьому оптимальний рівень вентиляції. Сучасні системи освітлення, що використовують світлодіоди (LED), дозволяють значно знизити споживання електроенергії. Крім того, використання систем автоматичного керування освітленням, які адаптуються до рівня природного освітлення та присутності людей у приміщенні, забезпечує додаткову економію (табл. 6) [2, 4].

Таблиця 6

Порівняння характеристик різних типів освітлення

Тип освітлення	Енергоефективність (лм/Вт)	Термін експлуатації (години)	Вартість (\$/шт)	Коефіцієнт енергоефективності
Лампи розжарювання	10-17	1,000	0.5-1	Низький
Галогенні лампи	20-30	2,000-5,000	1-2	Середній
Компактні люмінесцентні лампи (КЛЛ)	50-70	8,000-10,000	2-5	Високий
Світлодіодні лампи (LED)	80-100	25,000-50,000	5-15	Дуже високий

Сучасні тенденції в архітектурі та будівництві активно розвиваються в напрямку підвищення енергоефективності будівель, що відображається у використанні новітніх технологій та матеріалів. Серед них варто відзначити концепції «пасивного будинку», інтеграцію смарт-технологій та використання відновлюваних джерел енергії. «Пасивний будинок» – це концепція, яка спрямована на мінімізацію енергоспоживання через використання природних ресурсів та високоєфективних матеріалів. Такі будівлі мають герметичну оболонку,

високий рівень теплоізоляції, а також ефективну систему вентиляції з рекуперацією тепла. У результаті енергоспоживання на опалення та охолодження знижується до мінімуму [6]. Смарт-технології, такі як системи автоматичного керування освітленням, опаленням, вентиляцією та кондиціонуванням повітря (HVAC), дозволяють значно підвищити енергоефективність будівель. Вони забезпечують оптимальний режим роботи інженерних систем, що дозволяє знизити енергоспоживання, покращити комфорт для гостей та підвищити економічну ефективність будівлі (табл. 7) [3, 6].

Таблиця 7

Приклади смарт-технологій для підвищення енергоефективності

Смарт-технологія	Функціональність	Вплив на енергоефективність	Економія енергії (%)
Смарт-термостати	Автоматичне регулювання температури в залежності від присутності людей та зовнішніх умов	Оптимізація роботи систем HVAC	10-15%
Інтелектуальні системи освітлення	Автоматичне вмикання/вимикання світла в залежності від рівня природного освітлення та присутності людей	Зниження споживання електроенергії	20-30%
Системи управління енергією (EMS)	Моніторинг та аналіз енергоспоживання в режимі реального часу	Підвищення загальної ефективності будівлі	15-20%

Підсумовуючи отримані результати, цікаво порівняти вплив на енергоефективність основних архітектурних рішень, що розглянуто у табл. 8 [3, 6].

Таблиця 8

Порівняння основних архітектурних рішень за впливом на енергоефективність

Архітектурне рішення	Вплив на енергоефективність	Довгостроковий ефект	Вартість впровадження (\$)
Орієнтація будівлі	Високий	Знижує витрати на енергоспоживання	Відносно низька
Використання теплоізоляційних матеріалів	Дуже високий	Знижує тепловтрати та енерговитрати на кондиціонування	Середня
Інтеграція відновлюваних джерел енергії	Високий	Знижує залежність від традиційних енергоресурсів	Висока
Інтеграція смарт-технологій	Високий	Оптимізує роботу інженерних систем	Середня

Зрозуміло, що тільки інтегрований підхід до вибору тих чи інших архітектурних рішень у будівництві готелів та ресторанів допоможе отримати максимальний ефект з оптимізації енергоспоживання та енергоефективності як готельно-ресторанних закладів, так і у цілому бізнесу.

Висновки. Енергоефективність стає критично важливим аспектом розвитку готельно-ресторанного бізнесу. Впровадження енергоефективних технологій та рішень не лише сприяє зниженню експлуатаційних витрат, але й підвищує конкурентоспроможність готельно-ресторанного підприємства, покращує його імідж та робить більш привабливим для екологічно свідомих клієнтів. Енергоефективність готельних та ресторанных об'єктів значною мірою залежить від архітектурних рішень, прийнятих на етапі проєктування. Оптимізація орієнтації будівлі, вибір матеріалів, інтеграція відновлюваних джерел енергії та використання смарт-технологій здатні суттєво знизити енергоспоживання та покращити економічні показники об'єктів. Впровадження таких рішень стає необхідним у сучасних умовах, коли питання енергозбереження та екологічної стійкості стають все більш актуальними. Архітектурні рішення, що включають використання відновлюваних джерел енергії, енергозберігаючих матеріалів і розумних систем управління будівлями, дозволяють досягти високих показників енергоефективності. Це, у свою чергу, забезпечує сталий розвиток готелів та ресторанів, зменшуючи їхній екологічний слід і сприяючи збереженню природних ресурсів. Зважаючи на глобальні тенденції у сфері екології та енергоефективності, інвестиції в ці напрямки є не лише актуальними, але й необхідними для успішного розвитку готельно-ресторанного бізнесу в майбутньому. Енергоефективність, як складова стратегії сталого розвитку, стає важливим інструментом підвищення прибутковості та конкурентоспроможності на сучасному ринку. Інвестиції в енергоефективні технології часто сприймаються як додаткові витрати, які не завжди є пріоритетними для бізнесу. Проте, довгострокова перспектива свідчить про зворотнє: енергоефективність може суттєво впливати на прибутковість готелів та ресторанів. Зниження витрат на енергію безпосередньо збільшує прибутковість підприємства. Впровадження сучасних систем освітлення може знизити витрати на енергію на 20-40%, що особливо важливо в умовах зростання цін на

енергоресурси. Крім того, енергоефективні будівлі стають більш привабливими для гостей, які все більше звертають увагу на екологічні аспекти при виборі місця для проживання або харчування. Маркетингова перевага, яку надають сертифікати енергоефективності або участь у програмах сталого розвитку, може бути значущим фактором у конкуренції на ринку. Також варто відзначити, що інвестиції в енергоефективність часто мають незначний період окупності. Завдяки зниженню витрат на енергію, такі проекти можуть окупатися за 3-7 років, після чого готельно-ресторанне підприємство починає отримувати чистий прибуток.

Список використаних джерел:

1. Апатенко Т. М. Проектування об'єктів готельно-ресторанного господарства : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної і заочної форм навчання зі спеціальності 241 Готельно-ресторанна справа галузі знань 24 Сфера обслуговування; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. 45 с.
2. Pohrebniak, A. V., Yazina, V. A., Sabirov, O. V., Markov, I. Y. 2023. Sports nutrition of young athletes in similar facilities of hotel accommodation in Ukraine. *Systems and Technologies*, 65(1), pp. 147–153.
3. Язіна, В., Вишнікіна, О., Погребняк, А. 2021. Сучасні системи автоматизації устаткування підприємств ресторанного господарства. *Економіка та суспільство*, (33). URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-33-60>
4. Климчук А.О., Левицька І.В., Тарасюк Г.М. Проектування підприємств готельно-ресторанного бізнесу: навч. посібник. Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. 302 с.
5. Проектування готелів. URL: <http://www.pskopora.com.ua/ru/proectorovanie-hotels.html>
6. Пасивний будинок – енергія архітектури та технологій. URL: https://ecopanua.com/passivnyj-dom-sinerhiya-arhitektury-i-tehnologij/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_content=gid|aid|placement|&utm_term=&utm_campaign=21111066636_A_Performance_Max&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw_ZC2BhAQEiwAXSgCIm5XMQNa3APvloogiOclNCN7ut0SmPyHJbMGmh47X3IjWemco5piDRoCIDwQAvD_BwE

References:

1. Apatenko, T. M. (2022). Proiektuvannia obiektiv hotelno-restorannoho hospodarstva : konspekt leksii dlia zdobuvachiv pershoho (bakalavr's'koho) rivnia vyshchoi osvity dennoyi i zaochnoi form navchannia zi spetsial'nosti 241 Hotel'no-restoranna sprava haluzi znan' 24 Sfera obsluhovuvannia; Kharkiv. nats. un-t mis'k. hosp-va im. O. M. Beketova. Kharkiv : KhNUMH im. O. M. Beketova, 45 s.
2. Pohrebniak, A. V., Yazina, V. A., Sabirov, O. V., & Markov, I. Y. (2023). Sports nutrition of young athletes in similar facilities of hotel accommodation in Ukraine. *Systems and Technologies*, 65(1), 147–153.
3. Yazina, V., Vyshnikina, O., & Pohrebniak, A. (2021). Suchasni systemy avtomatyzatsii ustatkuvannia pidpriemstv restorannoho hospodarstva. *Ekonomika ta suspilstvo*, (33). URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-33-60>
4. Klymchuk A.O., Levytska I.V., & Tarasiuk H.M (2023). Proiektuvannia pidpriemstv hotelno-restorannoho biznesu: navch. posibnyk. Zhytomyr : Derzhavnyi universytet «Zhytomyrs'ka politekhnika», 302 s.
5. Proiektuvannia hoteliv (2024). URL: <http://www.pskopora.com.ua/ru/proectorovanie-hotels.html>
6. Pasyvnyi budynok – enerhiia arkhitektury ta tekhnolohii (2024). URL: https://ecopanua.com/passivnyj-dom-sinerhiya-arhitektury-i-tehnologij/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_content=gid|aid|placement|&utm_term=&utm_campaign=21111066636_A_Performance_Max&gad_source=1&gclid=CjwKCAjw_ZC2BhAQEiwAXSgCIm5XMQNa3APvloogiOclNCN7ut0SmPyHJbMGmh47X3IjWemco5piDRoCIDwQAvD_BwE

Шановні автори!

До наукового журналу «Системи та технології» приймаються рукописи наукових праць, які ніколи раніше не публікувалися і не призначені для одночасної публікації в інших виданнях.

Просимо враховувати вимоги до статей і порядку їх подання до публікації. Матеріали, оформлені з відхиленням від зазначених нижче вимог щодо порядку подання та оформлення наукової статті, редколегія не розглядає.

Приймаються статті, написані українською, англійською мовами.

Рукопис статті повинен мати такі елементи:

1 – УДК (вирівнювання по лівому краю). Визначити код – див. <http://www.udcsummary.info/php/index.php?lang=uk>;
2 – ініціали та прізвище автора (шрифт – напівжирний), науковий ступінь і вчене звання, посада та місце роботи (повна назва структурного підрозділу), ORCID (шрифт – прямий);

Кожен наступний співавтор з нового рядка.

3 – назва наукової статті (вирівнювання по центру, шрифт – напівжирний);

4 – анотація та ключові слова українською (середній обсяг анотації – не менше 1800 друкованих знаків);

5 – ініціали, прізвище автора, назву статті та анотацію англійською мовою (2000–2500 друкованих знаків), ключові слова англійською;

6 – текст наукової статті із зазначенням наступних елементів:

Постановка проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Мета статті.

Виклад основного матеріалу.

Висновки з дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі.

7 – Список використаних джерел у порядку згадування або у алфавітному порядку (подається мовою оригіналу та оформлюється за міждержавним стандартом ДСТУ 8302:2015 «Інформація та документація. Бібліографічне посилання. Загальні вимоги та правила складання»).

Посилання на літературні джерела в тексті наукової статті слід надавати в квадратних дужках [1, с. 56; 7, с. 45–51].

8 – References (транслітерація) (оформлюється у романському алфавіті в стилі APA Style Reference Citations відповідно до **Міжнародного стандарту APA**).

Зазначені елементи виділяються в рукописі напівжирним шрифтом.

Постановка проблеми виконується у загальному вигляді та наголошується на її зв'язку із важливими науковими чи практичними завданнями. Під час виконання аналізу останніх досліджень і публікацій, на які спирається автор та в яких розглядається досліджувана проблема і підходи до її розв'язання, необхідно виділити невіршені частини загальної проблеми, яку досліджують у статті. Виклад основного матеріалу дослідження виконується з повним обґрунтуванням здобутих наукових результатів.

Текст статті має бути набраний в текстовому редакторі Microsoft Word. Тип файлу – текст у форматі RTF або DOC(X).

Обсяг статті – 12–20 сторінок (Основна частина). Шрифт – Times New Roman, кегель – 14, міжрядковий інтервал – 1,5, поля – усі 2 см, абзац – 1 см. Форматування абзаців за допомогою інтервалів (пробілів) чи табуляції неприпустимо. У тексті необхідно використовувати лапки лише такого зразка: « ». У тексті заборонені переноси. Нумерація сторінок не ведеться.

Рисунки, схеми, таблиці, формули слід наводити у вигляді, що дозволяє їх коригування. Кількість таблиць, формул та ілюстрацій має бути мінімальною та доречною. Рисунки і таблиці на альбомних сторінках не приймаються.

Розміри таблиць та ілюстрацій не повинні перевищувати розміри друкованої сторінки збірника. Рисунки, графіки й таблиці повинні бути пронумеровані та мати назву (допускається шрифт тексту – Times New Roman, розмір – 12 пт). Найбільш складні рисунки пропонуються набирати, застосовуючи графічний редактор Microsoft Visio.

Під кожною табл. та рис. має бути зазначено джерело (Джерело: ...). Таблиці, графіки та рисунки мають бути контрастними та добре читатися. Ілюстративні матеріали потрібно розміщувати після посилання на них у тексті. Рисунки додатково подають окремим файлом Microsoft Excel. Одночасне використання таблиць і графіків для пояснення одних і тих самих положень не рекомендується.

Математичні формули мають бути ретельно перевірені та чітко надруковані. Формули пропонуються набирати, застосовуючи влаштований у MS Word редактор формул MathType 4.0 (6.0) Equation, або Microsoft Equation 3.0 з наступними розмірами символів: звичайний – 14 пт, крупний індекс – 10 пт, мілкий індекс – 7 пт, крупний символ – 18 пт, мілкий символ – 12 пт. Формули необхідно виділяти одним рядком від решти тексту, центрувати, нумерувати в круглих дужках, вирівняти до правої межі тексту.

Спеціальності, за якими можуть бути подані статті

113 – Прикладна математика (категорія Б)

122 – Комп'ютерні науки (категорія Б)

123 – Комп'ютерна інженерія (категорія Б)

125 – Кібербезпека та захист інформації (категорія Б)

275 – Транспортні технології (за видами) (категорія Б)

172 – Телекомунікації та радіотехніка (категорія Б)

241 – Готельно-ресторанна справа (категорія Б)

Передрук матеріалів дозволяється лише за письмової згоди редакції.

Матеріали, що публікуються, відображають позицію автора, яка може не збігатися з поглядом редакції.

За достовірність фактів, статистичних даних та іншої інформації відповідальність несе автор.

НОТАТКИ