

Міністерство освіти і науки України

Системні технології

System technologies

1 (156) 2025

Регіональний міжвузівський збірник наукових праць

Засновано у січні 1997 року.

У випуску:

- ПРОГРЕСИВНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА ОРГАНІЗАЦІЯ СУЧАСНОГО ВИРОБНИЦТВА
- МАТЕМАТИЧНЕ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМ
- СИСТЕМНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ
ТА КІБЕРБЕЗПЕКА

Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. –
Випуск 1 (156). - Дніпро, 2025. – 205 с.
ISSN 1562-9945 (Print).
ISSN 2707-7977 (Online).

Редакційна колегія випуску:

Алпатов А.П. - д.т.н., проф. (відп. редактор)
Архипов О.Є. - д.т.н., проф.
Білозьоров В.Є. - д.ф.-м.н., проф.
Бабічев С.А. (Чеська Республіка) - д.т.н., доц.
Єрьомін О.О. - д.т.н., проф.

Прогресивні інформаційні
технології та організація
сучасного виробництва

Гече Ф.Е. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гуда А.І. - д.т.н., проф.
Гнатушенко Вік.В. - д.т.н., проф.
Кіріченко Л.О. - д.т.н., проф.

Математичне
та програмне забезпечення
інтелектуальних систем

Гнатушенко В.В. - д.т.н., проф., (відп. редактор)
Гожий О.П. - д.т.н., проф.
Светличний Д.С. (Польща) - д.т.н., проф.
Хандецький В.С. - д.т.н., проф.

Системні технології обробки
інформації
та кібербезпека

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради
Українського державного університету науки і технологій
від 29.01.2025 р., № 7

Адреса редакції: 49600, Дніпро, пр. Науки, 4
Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»
кафедра Інформаційних технологій та систем.
Тел. +38(097)6854525
E-mail: st@nmetau.edu.ua
<https://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

© Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,
ІВК «Системні технології», 2025

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЯ ПОШИРЕННЯ ЗВУКОВИХ ХВИЛЬ У ЗВУЖЕНІЙ ЧВЕРТЬХВИЛЬОВІЙ ТРУБІ TQWT

Анотація. Моделювання та візуалізація поширення хвиль у середовищі із звуковідбиваючими елементами є важливим напрямком галузі комп'ютерних наук та обчислювальної математики. В роботі розглядається розробка алгоритмічної бази моделювання поширення звукових хвиль в акустичній системі у вигляді звуженої чвертьхвильової труби (TQWT). В основу комп'ютерного моделювання покладено алгоритм розрахунку поширення акустичної хвилі на основі диференційного рівняння з атенюацією, що дозволило розрахувати конструктивну та деструктивну інтерференцію хвилі, яка породжується лицьовою стороною динаміка, із хвилею, що виходить з порту акустичної системи. При розмірах сітки 512 x 288 швидкодія алгоритму склала більше 75 часових кроків за секунду з використанням процесору із паралельним обчисленням Intel UHD 630. В результаті роботи отримано мапи поширення хвиль у прямій та складеній звуженій трубі акустичної системи. Встановлено на основі мап, що зони акустичного збудження розташовуються всередині акустичного оформлення навпроти джерела хвиль. Показано, що акустичне оформлення у вигляді складеної звуженої чвертьхвильової труби ефективно тамує високі та середні частоти за рахунок затримки хвилі конфігурацією стінок позаду широкосмугового джерела, що усуває непередбачуване підсилення або атенюацію вказаних частот та, як наслідок, збільшує достовірність відтворення сигналу.

Ключові слова: хвильове моделювання, візуалізація, інтерференція, труба Войта, TQWT, лапласіан.

Постановка проблеми. Комп'ютерне моделювання і візуалізація поширення хвиль у середовищі із звуковідбиваючими елементами є затребуваним напрямком при проектуванні акустичних систем (АС).

Акустичне оформлення (АО) системи, окрім естетичної, відіграє роль навантаження акустичного динаміка, що значно збільшує ефективність останнього. В даній роботі розглядається АО у вигляді чвертьхвильової труби (Quarter Wavelength Tube), яку вперше описано Паулем Войтом в патенті GB447749 як підхід до покращення басової характеристики гучномовців.

Основна ідея АО у вигляді QWT від Пауля Войта полягає у використанні довгої труби з динаміком, який розміщено на одному з її кінців. Пряму трубу спроектовано для резонансного посилення хвиль низької частоти, чверть довжини яких дорівнює довжині

труби. Одночасно з підвищенням ефективності відтворення звуку, за рахунок акустичного навантаження, породжуються дві наступні проблеми: відтінок звучання АС на частотах, які конструктивно підтримуються за рахунок протяжності труби, починає нагадувати звучання композиції, в якій домінує лише одна нота; іншим недоліком – є породження непарних гармонік, які перетворюють АС у музичний інструмент з власним набором обертонів, що значно знижує точність відтворення музичного матеріалу.

Розвитком ідеї QWT є АО у вигляді труби, звуженої вздовж всієї довжини (Tapered QWT), яке дає змогу зменшити ефект «однієї ноти» за рахунок розширення резонансу на діапазон басових частот.

Розрахунок параметрів АО зазвичай [1-3] зводять до визначення ефективного об'єму та геометричних розмірів АС не проводячи розрахунок та візуалізацію зон стоячих хвиль, або інтерференції хвиль на виході АС. Наприклад, програмний застосунок Hornresp (Horn Loudspeaker Response Analysis Program) [4] може розраховувати АС, обираючи зі спектру відомих АО (закритий ящик, рупор) лише на основі емпіричних рівнянь. Дана робота ставить за мету усунення такого пробілу.

Метою роботи є розробка алгоритмічної бази комп'ютерного моделювання процесу інтерференції та візуалізації суперпозиції акустичних хвиль в АС з АО у вигляді прямої та складеної звуженої чвертьхвильової труби для порівняння достовірності сигналу, який вони відтворюють, та локалізації зон акустичного збудження всередині АО, де встановлення шару абсорбуючого матеріалу є ефективним для тамування хвиль.

Виходячи з теорії математичної фізики, відомо, що поширення акустичних хвиль відбувається на основі принципу суперпозиції, який є одним із ключових положень теорії хвиль [5]. Принцип стверджує, що коли дві або більше хвиль зустрічаються в одній точці простору, їхній загальний вплив дорівнює алгебраїчній сумі зміщень від окремих хвиль у цій точці. Це пояснює, чому хвилі можуть проходити одна через одну без взаємного спотворення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розрахунок поширення акустичних хвиль на основі принципу суперпозиції є важливим напрямком у сучасній фізиці та обчислювальній математиці [6]. Останні публікації [7, 8] свідчать про активний розвиток методів моделювання поширення хвиль у різних середовищах з акцентом на точність та обчислювальну ефективність.

Зокрема, методи чисельного розв'язку рівняння хвилі, такі як метод скінченних різниць, активно використовуються для моделювання хвильових процесів у різних сферах – від акустики та гідродинаміки до квантової механіки. Автори роботи [7] демонструють використання кінцево-різницевої схем для розрахунку розповсюдження акустичних хвиль при синтезі нотних звуків на основі вирішення ідеалізованого хвильового рівняння. Дослідження Лук'яненко С.О. [8] спрямовані на моделювання поширення теплових хвиль у металах з використанням адаптивних обчислювальних методів. Разом із переліченими успіхами, аналіз останніх публікацій показує, що підхід до вирішення задачі моделювання АО на основі розрахунку поширення акустичної хвилі досі лишається мало висвітленим у науковому середовищі.

На даний час розрахунок та візуалізації поширення звукових хвиль є можливим із застосуванням програмного застосунку ShaderToy від William Leu [9]. Застосунок надає можливість моделювати поширення хвиль та їх відбиття від перешкод, які задано у вигляді відрізків, двовимірних геометричних фігур. Ізотропним джерелом хвиль можуть виступати кола та капсули. Недоліком ShaderToy є неможливість моделювання дипольних випромінювачів, які створюють звукові хвилі з протилежними фазами по різні боки мембрани, що створює обмеження при моделюванні АС.

Основна частина. Принцип суперпозиції передбачає, що результат взаємодії двох або більше хвиль у будь-якій точці простору є алгебраїчною сумою їхніх окремих ефектів (1). Це означає, що хвилі можуть накладатися одна на одну, утворюючи нові амплітуди залежно від їхньої фази. Якщо хвилі перебувають у фазі, виникає конструктивна інтерференція, а якщо у протифазі – деструктивна інтерференція.

$$p_{total} = p_1 + p_2, \quad (1)$$

де p_1 і p_2 – тиски двох хвиль, що зустрічаються в точці.

На даний час відоме ідеалізоване рівняння (2) поширення акустичної хвилі у газі.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 p - \alpha \frac{\partial p}{\partial t}, \quad (2)$$

де p – скалярне значення тиску у точці простору;

c – швидкість поширення хвилі у даному середовищі;

∇^2 – оператор Лапласа, що описує швидкість та напрямок змін тиску в просторі;

α – коефіцієнт атенюації.

Приймаючи до уваги умову, що звукові хвилі в повітрі є коливальним рухом з невеликими амплітудами, скалярне поле швидкості при поширенні звуку через газ теж описується подібним хвильовим рівнянням.

Перепишемо рівняння (2) в координатах x, y двовимірного простору:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}(x, y, t) = c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2}(x, y, t) + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}(x, y, t) \right) - \alpha \frac{\partial p}{\partial t}(x, y, t), \quad (3)$$

де t – незалежна змінна часу.

Для вирішення рівняння (3) скористайтесь чисельними методами кінцевих різниць. Апроксимуємо перший член рівняння за допомогою рівняння у вигляді схеми з різницею назад і помилкою пропорційною $O(\Delta t^2)$:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}(x, y, t) \approx \frac{p(x, y, t + \Delta t) - 2p(x, y, t) + p(x, y, t - \Delta t)}{\Delta t^2}. \quad (4)$$

Апроксимуємо вираз у дужках рівняння (3) за центральною схемою:

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}(x, y, t) + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2}(x, y, t) \approx \\ \frac{p(x + \Delta x, y, t) - 2p(x, y, t) + p(x - \Delta x, y, t)}{\Delta x^2} + \end{aligned} \quad (5)$$

$$+ \frac{p(x, y + \Delta y, t) - 2p(x, y, t) + p(x, y - \Delta y, t)}{\Delta y^2}.$$

Замінімо правий бік рівняння (3) двоточною кінцевою різницею, та підставимо вирази (4) та (5), отримаємо:

$$\begin{aligned} & \frac{p(x, y, t + \Delta t) - 2p(x, y, t) + p(x, y, t - \Delta t)}{\Delta t^2} = \\ & = c^2 \left(\frac{p(x + \Delta x, y, t) - 2p(x, y, t) + p(x - \Delta x, y, t)}{\Delta x^2} \right) + \\ & + c^2 \left(\frac{p(x, y + \Delta y, t) - 2p(x, y, t) + p(x, y - \Delta y, t)}{\Delta y^2} \right) - \\ & - \alpha \frac{p(x, y, t) - p(x, y, t - \Delta t)}{\Delta t}. \end{aligned} \quad (6)$$

Перегрупуємо компоненти рівняння (6) виразивши невідоме значення тиску $p(x, y, t + \Delta t)$ та додаймо умову рівності кроків апроксимації рівняння за напрямком x та y ($\Delta x = \Delta y = \Delta h$):

$$\begin{aligned} p(x, y, t + \Delta t) = & \left(\frac{c\Delta t}{\Delta h} \right)^2 (p(x + \Delta x, y, t) - 4p(x, y, t) + p(x - \Delta x, y, t) + \\ & + p(x, y + \Delta y, t) + p(x, y - \Delta y, t)) + \\ & + 2p(x, y, t) - p(x, y, t - \Delta t) - \alpha \Delta t (p(x, y, t) - p(x, y, t - \Delta t)). \end{aligned} \quad (7)$$

Рівняння (7) дає можливість обчислити значення тиску у кожному вузлі сітки для часу $t + \Delta t$ виходячи зі значень полів двох попередніх часових точок: t та $t - \Delta t$.

Дипольним джерелом коливань виступають два відрізка, які формують границі Діріхле із синусоїдальним законом зміни тиску:

$$f(t) = A \sin(\omega \cdot t), \quad (8)$$

де ω – кутова частота;

A – амплітуда хвилі.

Необхідною умовою збіжності при розв’язуванні рівняння (7) є виконання умови Куранта – Фрідрікса – Леві:

$$C = c \frac{\Delta t}{\Delta h} \leq \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (9)$$

де C – число Куранта.

Нерівність (9) забезпечує, що відстань поширення хвилі внаслідок плину часу не перевищує крок дискретизації сітки, що є аналогом умови Найквіста для відновлення сигналу після процесу дискретизації – кількість вибірок сигналу має бути у два рази більша ніж частота сигналу.

Алгоритм комп’ютерного моделювання процесу інтерференції та візуалізації суперпозиції акустичних хвиль на процесорі із паралельним обчисленням складається з кроків, що описано нижче.

Крок 1 Створити текстуру T з двома компонентами r та g у форматі плаваючої точки повної точності з розрізненням, яке відповідає кількості вузлів сітки моделювання. Компоненти r та g відповідають часовим точкам t та $t - \Delta t$.

Крок 2 Для кожного текселю текстури T з координатами x та y виконати наступні дії:

Дія 2а На першій ітерації ініціалізувати тексель нульовим значенням.

Дія 2б Провести вибірку з текстури T значень тиску, які відповідають часовим точкам $t - \Delta t$ та t ; якщо розрахунок ведеться для точки з координатами, які співпадають з координатами звуко-відбиваючого елемента АО, прийняти до уваги граничні умови у вигляді Діріхле.

Дія 2в Розрахувати значення тиску, яке відповідає часовій точці $t + \Delta t$ у відповідності до рівняння (7).

Дія 2г Якщо розрахунок ведеться для точки з координатами, які співпадають з координатами випромінювача, замінити розраховане значення тиску на значення тиску випромінювача у відповідності до рівняння (8).

Дія 2д Записати розраховане та попереднє значення тиску до r та g компонент текстури T відповідно.

Крок 3 Візуалізувати текстуру T на екрані.

Крок 4 Перейти до кроку 2.

Програмна реалізація. Для моделювання процесу поширення хвиль розроблено веб застосунок на мові програмування JS центрального процесору та мові GLSL ES графічного процесору паралельних обчислень, який працює за представленим алгоритмом. Програма проводить візуалізацію процесу поширення хвиль у реальному часі виходячи з початкових параметрів середовища, такі як: геометрична конфігурація АО, яка конструюється із застосуванням відрізків, координати розміщення та геометрична конфігурація джерела хвиль, кутова швидкість генератора та амплітуда хвилі, число Куранта, коефіцієнт атенюації, розмір сітки моделювання.

Приклади роботи програмного застосунку моделювання двох АС представлено на рис.1,2. Сірий колір елементів мапи відповідає нульовому рівню тиску, чорний і білий — його максимальним значенням.

Результати, щодо розробленого алгоритму комп'ютерного моделювання та візуалізації поширення акустичних хвиль в повітрі:

- довжина кроку Δh значно впливає на довжину хвилі, що утворюється, – при зменшенні кроку довжина хвилі зменшується;
- успішність моделювання поширення хвилі низької частоти в значній мірі залежить від коректного значення амплітуди A джерела хвилі – недостатня амплітуда приводить до швидкого розсіювання хвилі;
- представлений алгоритм при використанні 5-ти точкової апроксимації лапласіану зберігає стійкість при $C < 0.5$, а при використанні 9-ти точкової апроксимації (з діагональними елементами) – $C < \sqrt{2}$; при збільшенні порогового значення C алгоритм лавиноподібно розходиться;

– представлений алгоритм є придатним до розпаралелювання, оскільки кінцево-різницевої схеми, що задіяно для розрахунків тиску у кожному вузлі сітки, не залежать від значень тиску поточного кроку у сусідніх точках: при розмірах сітки 512 x 288 кількість часових кроків за секунду склала більше 75 з використанням процесору із паралельним обчисленням Intel UHD 630.

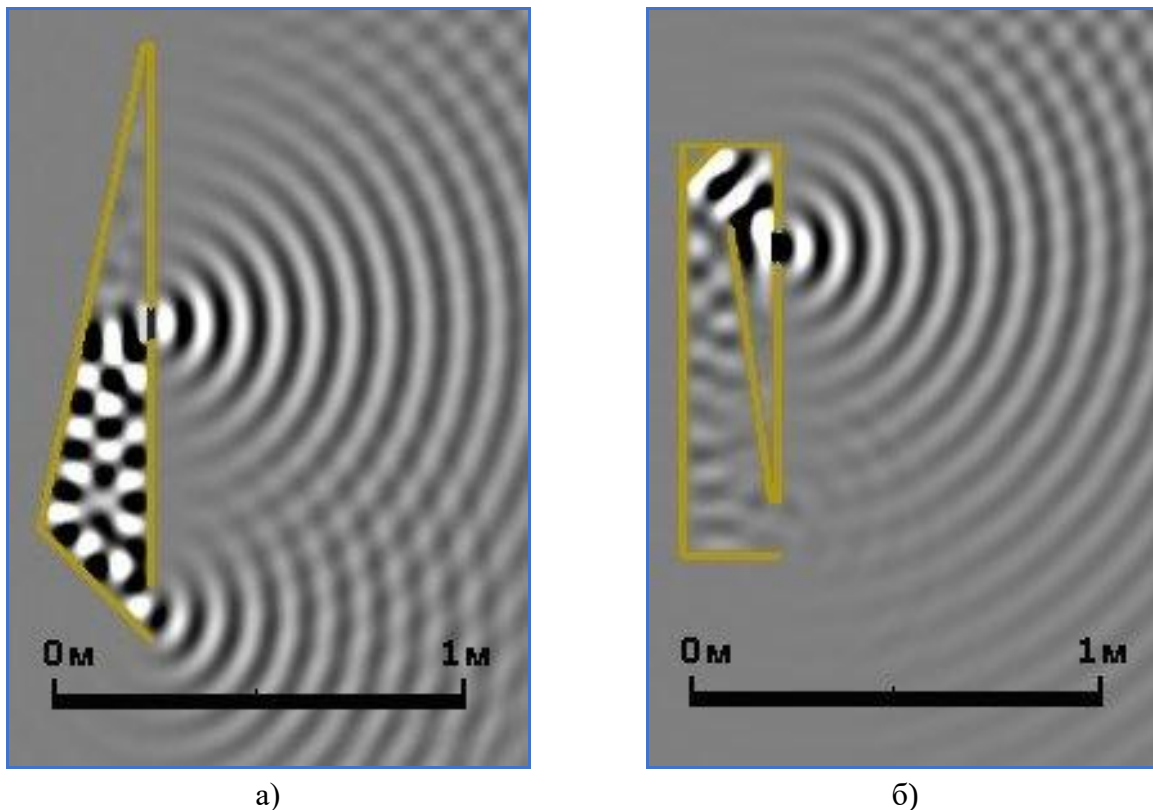


Рисунок 1 – Мапа поширення хвилі у а) прямій та б) складеній звуженій чвертьхвильової трубі при параметрах моделі:

$$C = \sqrt{2}, \alpha = 0.005, \omega = 20, A = 2, \text{ розмір сітки моделювання } 200 \times 300$$

Результати комп'ютерного моделювання АС з АО у вигляді прямої та складеної звуженої чвертьхвильової труби:

- на басовій довжині хвиль кімната утворює з АС єдину систему, що вимагає прийняття її до уваги під час моделювання;
- АО у вигляді складеної звуженої чвертьхвильової труби ефективніше тамус високі та середні частоти за рахунок затримки хвилі конфігурацією стінок АО позаду широкосмугового джерела, що усуває непередбачуване підсилення або атенюацію вказаних частот та, як наслідок, збільшує достовірність відтворення сигналу;
- зони акустичного збудження розташовуються всередині АО навпроти джерела хвилі;
- обидва АО однаково добре розбивають стоячу хвилю з довжиною у чверть хвилі за рахунок зміщеної позиції джерела хвилі від глухого кінця труби та зміни перерізу труби вздовж її довжини.

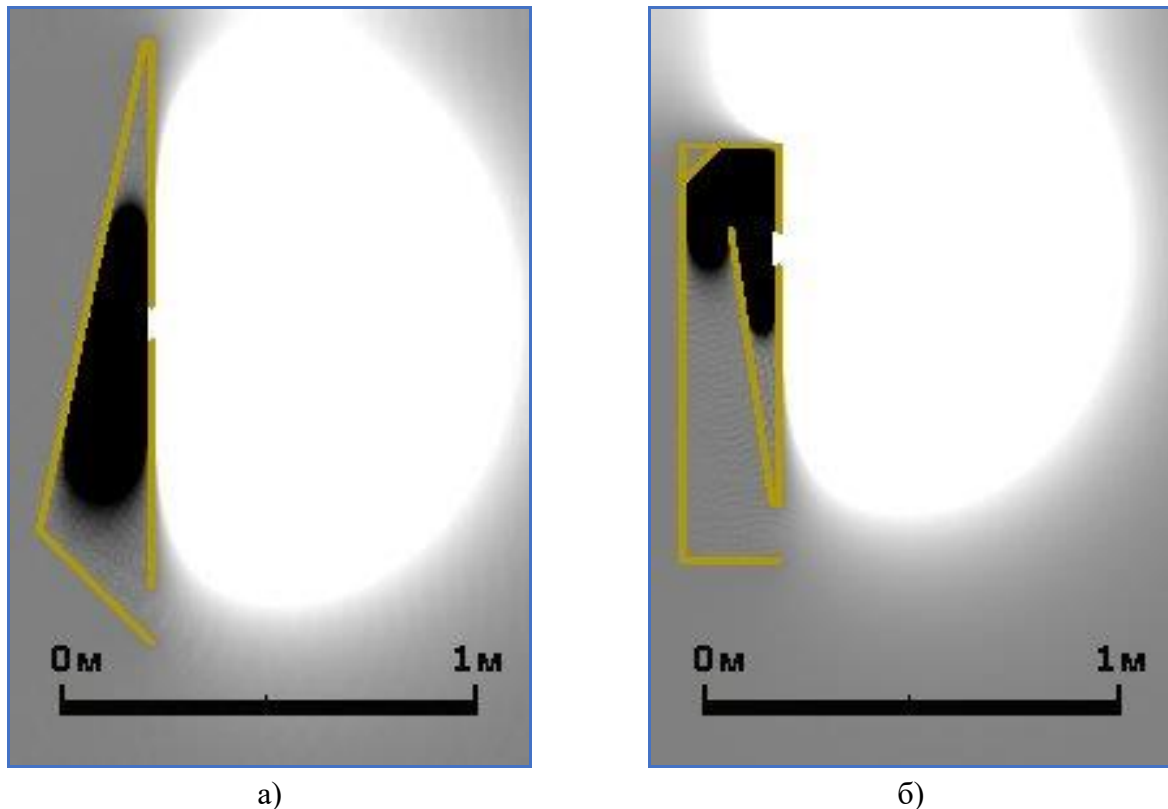


Рисунок 2 – Мапа поширення хвилі у а) прямій та б) складеній звуженій чвертьхвильовій трубі при параметрах моделі:

$$C = \sqrt{2}, \alpha = 0.002, \omega = 2, A = 2000, \text{ розмір сітки моделювання } 200 \times 300$$

Висновки. Розроблено алгоритм комп'ютерного моделювання процесу інтерференції та візуалізації суперпозиції акустичних хвиль та проведено його реалізацію на процесорі із паралельним обчисленням. Розраховано мапи поширення хвиль у прямій та складеній звуженій чвертьхвильовій трубі, що дало змогу порівняти АС за характеристикою достовірності сигналу, який вони відтворюють. Показано, що АС з АО у вигляді заломленої звуженої чвертьхвильової труби має більшу достовірність відтворення сигналу. Встановлено на основі мап, що зони акустичного збудження розташовуються всередині акустичного оформлення навпроти джерела сигналу.

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Dickason V. Loudspeaker Design Cookbook. 8th Ed. : KCK Media, 2023. 398 p.
2. Eargle J. JBL Sound system design Reference manual. 3d Ed.: JBL Professional, 1999. 87 p.
3. King M.J. Horn Physics. MJK, 2008. 29 p.
4. Karlsson H. Hornresp Manual. 2001. 161 p.
URL: <https://www.scribd.com/document/692315064/Hornresp-Manual> (date of access 20.11.2024)
5. Verma N. Physics for Engineers. PHI Learning Pvt. Ltd., 2013. p.361.
6. Strauss W. Partial differential equations: An introduction. Wiley, 2007. 464 p. ISBN-13: 978-0470054567

7. Finite difference schemes in musical acoustics: A tutorial / Bilbao S., Hamilton B., Harrison R.L., Torin A. *Springer Handbook of Systematic Musicology* / 2018. P. 349-384.
8. Lukjanenko S.A., Nimchuk I.B. Using adaptive difference meshes at modeling two-dimensional thermal wave. *System research and information technologies*. 2005. № 3, P. 88-98. ISSN 1681–6048
9. Leu W. Playing around with a 2D wave algorithm. 2021.
URL: <https://pixeleuphoria.com/blog/index.php/2021/01/19/playing-around-with-a-2d-wave-algorithm/> (date of access 20.11.2024)

Received 10.01.2025.
Accepted 13.01.2025.

Computer-aided modeling and visualization of sound waves propagation in a Tapered Quarter Wavelength Tube

The paper presents the algorithmic basis for computer-aided modeling of sound wave propagation in an acoustic system with an acoustic design in the form of a straight and folded tapered quarter wavelength tube (TQWT). The aim of the modeling is to compare the systems by fidelity of the signal reproduced and localize acoustic excitation zone inside the acoustic system, where installation of a layer of absorbing material is effective for control of wave propagation.

The computer-aided modeling of acoustic wave propagation utilizes an algorithm based on a hyperbolic differential equation with attenuation component. A web application has been developed in JS programming language for CPU and GLSL ES language for parallel computing on GPU, which works according to the presented algorithm to simulate the wave propagation process. The program visualizes wave propagation in real-time based on the initial parameters of the environment, such as: the geometric configuration of acoustic enclosure (constructed using line segments), the coordinates of the location and geometric configuration of the wave source, angular velocity of the generator and the wave amplitude, the Courant number, the attenuation coefficient, the size of the simulation grid.

The software made it possible to calculate the constructive and destructive interference maps of the wave generated by the speaker's front side with the wave emerging from the acoustic system's port of straight and folded tapered pipe. With a grid size of 512 x 288, the algorithm achieved a processing speed of over than 75 time-steps per second using a processor with parallel computing Intel UHD 630. The maps showed that the zones of acoustic excitation were located inside the acoustic enclosure opposite to the wave source. It is shown that the acoustic enclosure in the form of a folded TQWT effectively suppresses high and medium frequencies by attenuating the wave with the configuration of the walls behind the broadband source. The configuration prevents unpredictable amplification or attenuation of the specified frequencies and, as a result, increases the fidelity of signal reproduction.

Демчишин Анатолій Анатолійович – к.т.н., доцент кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; старший науковий співробітник, Інститут проблем матеріалознавства імені І.М. Францевича Національної академії наук України.

Каленюк Олександр Сергійович – к.т.н., старший викладач кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

Demchyhyn Anatoliy Anatoliyovych – candidate of technical sciences, assistant professor of Department of Digital Technologies in Energy, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”; senior researcher, Frantsevich Institute for Problems of Materials Science NASU.

Kaleniuk Oleksandr Sergiyovych - candidate of technical sciences, senior lecturer of Department of Digital Technologies in Energy, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”.

АВТОМАТИЗАЦІЯ РОЗРОБКИ WIN32 ДЕСКТОПНИХ ДОДАТКІВ: ПРАКТИЧНІ ПІДХОДИ І СТРАТЕГІЇ

Анотація. Пропонується огляд сучасних підходів до автоматизації розробки Win32 десктопних додатків з використанням практик DevOps. Описуються ключові етапи, такі як Continuous Integration (CI) та Continuous Deployment (CD), які допомагають розробникам автоматизувати збірку, тестування та розгортання додатків, знижуючи ризики помилок. Особлива увага приділяється автоматизованому тестуванню, яке включає модульні тести, функціональні тести та тести продуктивності для забезпечення стабільності додатків. Розглядаються підходи до інфраструктури як коду (IaC), які дозволяють автоматизувати налаштування та керування середовищами розробки. Серед інструментів виділяються Terraform, Ansible, та PowerShell DSC. Також включено розгляд збереження документів у хмарному сховищі з використанням Minio, що забезпечує безпечне та масштабоване зберігання даних. Завдяки цим практикам та інструментам, розробка Win32 десктопних додатків стає більш ефективною, надійною та швидкою.

Ключові слова: розробка програмного забезпечення, автоматизація розробки програмного забезпечення, DevOps, Continuous Integration (CI), Continuous Deployment (CD), інфраструктура як код, автоматизоване тестування, Terraform, Ansible, PowerShell DSC, Minio, збереження документів у хмарі, хмарне сховище, розгортання, Windows, хмарні технології.

Постановка проблеми. Розробка Win32 десктопних додатків є складним процесом, який вимагає значних зусиль з боку розробників для забезпечення їхньої якості, стабільності та продуктивності. Зі зростанням вимог до функціональності, швидкості випуску оновлень і надійності, зростає необхідність в автоматизації процесів розробки, тестування та розгортання. Без впровадження автоматизації можливі часті помилки, затримки у випуску та труднощі з підтримкою високих стандартів якості. Постає питання, як ефективно впроваджувати практики DevOps для автоматизації цих процесів у середовищі розробки Win32 додатків, мінімізуючи людські помилки та підвищуючи ефективність.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автоматизація розробки програмного забезпечення на основі DevOps-практик стала ключовою темою сучасних досліджень. Одним із напрямків є автоматизація управління безпекою, зокрема у промислових DevOps-проектах. У статті М. Voggenreiter та ін. [1] розглядається впровадження мето-

дології для автоматизації управління безпековими виявленнями в DevOps-середовищі. Автори пропонують систему Security Flama, яка використовує семантичну базу знань для управління безпековими ризиками. На основі дослідження двох промислових проєктів було підтверджено, що впровадження цієї методології покращує управління безпековими вразливостями та сприяє зменшенню ризиків у процесі розробки. Хоча дослідження орієнтоване на промислові DevOps-проєкти, підходи до автоматизації безпеки можуть бути корисними і для Win32-додатків, де безпека залишається критичним аспектом розробки.

Дослідження S. Duque Anton та ін. [2] зосереджено на проблемах автоматизації безпеки в розподілених IoT-системах, інтегрованих у DevOps-середовище. Хоча фокус статті на IoT, багато інструментів і підходів, що описані для автоматизації безпеки та процесів розгортання, можуть бути адаптовані для десктопних Win32-додатків. Зокрема, стаття описує інструменти, що використовуються на різних етапах DevOps-процесів, і пропонує рішення для підвищення їх безпеки, враховуючи специфіку розподілених систем. Інтеграція таких методів може забезпечити надійність і для Win32-додатків, особливо у випадках складної архітектури чи розподілених середовищ.

Іншим важливим напрямком є дослідження ролі штучного інтелекту (AI) у DevOps-процесах. У статті M. Alenezi та ін. [3] розглядається, як AI може значно покращити автоматизацію процесів, таких як тестування, моніторинг та аналіз логів. AI допомагає виявляти потенційні проблеми на ранніх стадіях і оптимізувати роботу програмного забезпечення. Для Win32-додатків ці технології можуть бути використані для покращення якості продукту через вдосконалене тестування та прогнозування можливих помилок. Стаття підкреслює важливість інтеграції AI у DevOps для підвищення продуктивності команд і забезпечення швидкої реакції на зміни.

Культурні аспекти впровадження DevOps також відіграють важливу роль у успішній інтеграції цих практик. У дослідженні W. Luz та ін. [4] увага приділяється не тільки автоматизації інструментів, але й співпраці між командами розробки та експлуатації. Автори виявили, що успішна реалізація DevOps залежить не стільки від використання конкретних інструментів, скільки від побудови ефективної культури взаємодії в організації. Це дослідження охоплює аналіз впровадження DevOps у 15 компаніях із різних країн та пропонує модель успішного впровадження практик DevOps. Впровадження таких культурних змін може бути корисним і для команд, що працюють з Win32-додатками, оскільки вони часто включають міждисциплінарну співпрацю між розробниками, тестувальниками та операційними командами.

Загалом, хоча більшість досліджень присвячена DevOps у загальному контексті або на прикладі IoT та промислових систем, принципи автоматизації, управління безпекою та культурних змін можуть бути успішно адаптовані і для Win32-додатків, що відкриває простір для подальших досліджень у цьому напрямку.

Мета дослідження. Вивчення та впровадження сучасних практик автоматизації розробки Win32 десктопних додатків з використанням DevOps-методологій. Дослідження спрямоване на аналіз основних етапів автоматизації, таких як Continuous Integration (CI), Continuous Deployment (CD), автоматизоване тестування, а також застосу-

вання інфраструктури як коду (IaC) для управління середовищами розробки. Особлива увага приділяється використанню інструментів, таких як Terraform, Ansible, PowerShell DSC, та зберіганню даних у хмарі за допомогою Minio.

Вступ. Розроблення десктопних додатків для операційної системи Windows завжди була важливим аспектом програмної інженерії. З плином часу вимоги до додатків постійно зростають, а також змінюються стратегії розробки та впровадження. У сучасному світі важливо не лише швидко розробляти, але і ефективно впроваджувати додатки, щоб вони задовольняли потреби користувачів та відповідали вимогам бізнесу.

Ця стаття присвячена розгляду практичних підходів і стратегій, які допоможуть розробникам десктопних додатків на платформі Windows максимально автоматизувати розробку проєктів, забезпечуючи ефективність та швидкість у розробці.

Розглядаються важливі аспекти DevOps такі як Continuous Integration (CI) і Continuous Deployment (CD), автоматизоване тестування, використання інфраструктури як коду та інші практики, які можуть бути використані для оптимізації процесу розробки Win32-десктопних додатків.

Ця стаття призначена для розробників, які зацікавлені в покращенні своїх навичок у розробці десктопних додатків та впровадженні сучасних практик розробки. Безперечно, правильне застосування автоматизації може значно спростити і прискорити процес розробки, що в свою чергу дозволить команді більш ефективно відповідати на вимоги ринку та задовольняти потреби користувачів.

Важливість автоматизації в розробці Win32 десктопних додатків. Розробка десктопних додатків для платформи Windows може бути складним та часовитратним процесом, особливо з урахуванням постійно зростаючих вимог до функціональності та якості продукту. У таких умовах важливо мати ефективні інструменти та стратегії, які дозволяють прискорити процес розробки та забезпечити якість продукту.

Автоматизація в розробці є однією з ключових стратегій, яка дозволяє досягти цих цілей. Шляхом автоматизації різних аспектів розробки, таких як збірка, тестування, розгортання та моніторинг, розробники можуть значно скоротити час витрачений на ці процеси та знизити ймовірність помилок.

Одним з основних переваг автоматизації є збільшення швидкості розробки. Замість того, щоб витрачати час на рутинні завдання, розробники можуть сконцентруватися на більш важливих аспектах розробки, таких як розробка нового функціоналу або вдосконалення інтерфейсу користувача.

Крім того, автоматизація дозволяє забезпечити більшу стабільність та надійність додатків. Автоматизовані тести можуть виявляти помилки та проблеми раніше, ніж вони вплинуть на кінцевого користувача, що дозволяє швидко їх виправляти та підвищує якість продукту.

Не менш важливим є забезпечення консистентності та відновлюваності процесів розробки. Завдяки автоматизації, кожен етап розробки може бути чітко визначений і повторюваний, що сприяє стандартизації та полегшує спільну роботу команди розробників [13].

Continuous Integration (CI) для Win32 десктопних додатків. Continuous Integration (CI) є однією з ключових практик розробки програмного забезпечення, яка полягає в автоматизованому процесі збірки та перевірки додатка при кожній зміні вихідного коду. Для Win32 десктопних додатків, CI може стати незамінним інструментом для забезпечення якості продукту та швидкості розробки.

Основні складові Continuous Integration для Win32 десктопних додатків включають:

1. **Автоматизована збірка додатку:** Налаштування скриптів або конфігураційних файлів, які автоматично збирають додаток з вихідного коду при кожній зміні. Це дозволяє впевнитися, що новий код компілюється правильно та не видає помилок.

2. **Модульні тести:** Включення автоматизованих модульних тестів у процес CI для перевірки правильності роботи окремих компонентів додатку. Це допомагає виявити помилки та недоліки на ранніх етапах розробки.

3. **Автоматизовані тести взаємодії на рівні GUI:** Додавання автоматизованих тестів взаємодії на рівні графічного інтерфейсу користувача для перевірки функціональності та коректності роботи додатку з точки зору кінцевого користувача.

4. **Інтеграція з системою керування версіями:** Налаштування CI-системи для автоматичного відслідковування змін у вихідному коді та запуску процесу CI при кожному новому коміті у репозиторій.

Застосування Continuous Integration для Win32 десктопних додатків дозволяє розробникам ефективно впроваджувати новий функціонал та вчасно виявляти та виправляти помилки, забезпечуючи стабільність та якість продукту [10].

Continuous Deployment стратегії для Win32 десктопних додатків. Continuous Deployment (CD) є важливим етапом у процесі розробки десктопних додатків для операційної системи Windows. Він передбачає автоматизоване розгортання нових змін та оновлень у додатку в продуктивному середовищі. Для Win32 десктопних додатків, які можуть мати складну структуру та залежності, важливо мати чітку та ефективну стратегію CD.

Основні стратегії Continuous Deployment для Win32 десктопних додатків включають:

1. **Автоматичне розгортання на тестове середовище:** Після успішного завершення процесу Continuous Integration (CI), збірка додатку автоматично розгортається на тестове середовище. Це дозволяє тестувати новий функціонал та виправлення помилок перед їхнім впровадженням у продуктивне середовище.

2. **Умове розгортання на продуктивне середовище:** Перед повним розгортанням нових змін у продуктивне середовище можна використовувати стратегії умовного розгортання. Наприклад, можна впроваджувати новий **функціонал** лише для обмеженої кількості користувачів або географічних регіонів, щоб виявити потенційні проблеми перед широким впровадженням.

3. **Автоматичне розгортання в продуктивне середовище:** Після успішного завершення всіх тестів і підтвердження якості збірки, додаток автоматично розгортається

в продуктивне середовище. Це дозволяє **забезпечити** найшвидше розгортання нового функціоналу та виправлень помилок для користувачів.

Застосування стратегій Continuous Deployment дозволяє розробникам зберігати високу швидкість розробки та зменшувати час між розробкою нового функціоналу та його впровадженням для кінцевих користувачів [11].

Автоматизоване тестування Win32 десктопних додатків. Автоматизоване тестування є необхідною складовою процесу розробки десктопних додатків для операційної системи Windows. Для Win32 десктопних додатків, які мають складну логіку та інтерфейс, важливо мати надійні та ефективні автоматизовані тести, які перевіряють різні аспекти додатку.

Основні види автоматизованих тестів для Win32 десктопних додатків включають:

1. **Модульні тести:** Це тести, які перевіряють окремі компоненти програмного забезпечення. У випадку Win32 десктопних додатків, це може бути тестування окремих функцій або методів.

2. **Функціональні тести:** Ці тести перевіряють функціональність додатку з точки зору кінцевого користувача. Вони дозволяють переконатися, що програма працює так, як очікується, і виконує всі необхідні функції.

3. **Тести взаємодії на рівні GUI:** Ці тести перевіряють коректність роботи графічного інтерфейсу користувача. Вони переконуються, що всі елементи і кнопки на формах працюють правильно та реагують на взаємодію користувача.

4. **Тести продуктивності:** Ці тести перевіряють швидкість та продуктивність додатку в різних умовах навантаження. Вони дозволяють виявити можливі проблеми з продуктивністю та оптимізувати роботу додатку.

5. **Тести безпеки:** Ці тести перевіряють захищеність додатку від різних видів атак та вразливостей. Вони допомагають забезпечити безпеку додатку перед випуском в продуктивне середовище.

Застосування автоматизованих тестів для Win32 десктопних додатків допомагає забезпечити якість та стабільність програми, зменшуючи кількість помилок та проблем, які можуть виникнути в процесі розробки [12].

Інфраструктура як код (IaC) для управління середовищами розробки. Інфраструктура як код (Infrastructure as Code, IaC) — це підхід до управління інфраструктурою, який полягає в автоматизованому конфігуруванні та управлінні інфраструктурними ресурсами за допомогою коду. Для розробки Win32 десктопних додатків, IaC може бути корисним для створення та управління тестовими, розробочими та продуктивними середовищами.

Основні переваги використання IaC для управління середовищами розробки включають:

1. **Консистентність середовищ:** За допомогою IaC, середовища розробки можуть бути легко створені та розгорнуті з точністю до деталей. Це дозволяє забезпечити, що кожен член команди працює з однаково налаштованим середовищем, що сприяє консистентності та уникненню конфліктів.

2. Швидкість розгортання: Замість ручного налаштування середовищ для розробки, IaC дозволяє автоматизувати процес створення та розгортання середовищ, що прискорює розгортання нових версій додатку та відлагодження проблем.

3. Скорочення часу відновлення: У випадку виникнення проблем або потреби у відновленні середовища, IaC дозволяє легко відновити попередній стан за допомогою автоматизованих процесів.

4. Відслідковування змін: Код IaC зберігається в системі керування версіями, що дозволяє відстежувати всі зміни до інфраструктури та відкатувати їх у випадку необхідності.

Застосування IaC для управління середовищами розробки дозволяє забезпечити швидкість, консистентність та надійність інфраструктури, що використовується для розробки Win32 десктопних додатків [13]. Далі буде наведено декілька ключових інструментів і практик, які можуть бути використані для реалізації Інфраструктури як коду при розробці Win32 додатків:

Terraform є потужним інструментом для управління інфраструктурою, що підтримує різноманітні платформи, включаючи хмарні сервіси, такі як AWS, Azure, Google Cloud та локальну інфраструктуру. Він дозволяє створювати інфраструктуру за допомогою декларативного коду. У випадку з Win32 додатками, Terraform може бути використаний для автоматизації створення віртуальних машин, мереж та інших ресурсів, які необхідні для роботи та тестування додатку [10].

Приклад використання Terraform:

- створення та налаштування віртуальних машин Windows для автоматизованого тестування та розгортання Win32 додатків;
- налаштування середовищ з необхідними залежностями та конфігураціями для кожного члена команди.

Ansible — це інструмент для автоматизації конфігурації, який може використовуватися для керування середовищами розробки та тестування. Ansible використовує прості YAML-файли (плейбуки) для опису конфігурацій інфраструктури та може керувати налаштуванням як локальних серверів, так і хмарних середовищ [11].

Приклад використання Ansible:

- автоматизація встановлення необхідних пакетів і залежностей для Win32 додатків на віртуальних машинах або фізичних серверах;
- управління оновленнями операційних систем та налаштуванням середовищ для розробки та тестування.

PowerShell DSC (Desired State Configuration) — це інструмент управління конфігурацією, який дозволяє керувати станом серверів Windows. Він використовує декларативний підхід для забезпечення того, щоб сервери залишалися в бажаному стані. Це особливо корисно для забезпечення стабільності та надійності середовищ для розробки Win32 додатків [12].

Приклад використання PowerShell DSC:

- налаштування та підтримка стабільного середовища для розробки та тестування Win32 додатків;

– автоматизація оновлень програмного забезпечення та налаштувань серверів Windows.

Практики реалізації IaC для Win32 додатків

1. **Стандартизація конфігурацій:** Використання IaC допомагає стандартизувати конфігурації середовищ для всіх етапів розробки, тестування та розгортання. Створення чітких та узгоджених конфігурацій підвищує стабільність та прогнозованість процесів.

2. **Автоматизоване налаштування середовищ:** За допомогою IaC можна автоматизувати не тільки створення інфраструктури, але й її налаштування. Це включає встановлення необхідних пакетів, налаштування мережевих параметрів та конфігурацію системного програмного забезпечення, необхідного для роботи додатка.

3. **Керування версіями інфраструктури:** IaC дозволяє використовувати системи керування версіями, такі як Git, для контролю над змінами в конфігурації інфраструктури. Це дозволяє легко відстежувати зміни, відкотити їх у випадку проблем або автоматично застосовувати нові версії.

4. **Тестування інфраструктури:** Як і код додатків, конфігурації IaC можуть бути протестовані перед їх впровадженням. Це дозволяє виявляти помилки в інфраструктурі до її розгортання, що знижує ризик простоїв та збоїв.

Інструменти та технології для автоматизації розробки Win32 десктопних додатків. Існує багато інструментів та технологій, які можна використовувати для автоматизації розробки Win32 десктопних додатків. Деякі з них спрямовані на автоматизацію конкретних аспектів розробки, таких як збірка чи тестування, тоді як інші надають повний набір інструментів для управління розробкою та розгортанням.

Ось деякі з найпопулярніших інструментів та технологій для автоматизації розробки Win32 десктопних додатків:

1. Visual Studio: Інтегроване середовище розробки (IDE) для мови програмування C#, яке надає широкі можливості для автоматизованої збірки, тестування та розгортання Win32 десктопних додатків.

2. Azure DevOps: Платформа для управління життєвим циклом розробки програмного забезпечення, яка надає інструменти для Continuous Integration, Continuous Deployment та інші автоматизовані процеси.

3. TeamCity: Інструмент Continuous Integration та Continuous Deployment від компанії JetBrains, який підтримує різні мови програмування, включаючи C#.

4. Selenium: Фреймворк для автоматизованого тестування вебдодатків, який може бути використаний для тестування вебінтерфейсу десктопних додатків, що використовують браузерні компоненти.

5. PowerShell: Мова сценаріїв для автоматизації адміністративних завдань у середовищі Windows, яка може бути використана для автоматизації різних аспектів розробки, таких як збірка, тестування та розгортання.

6. Docker: Платформа контейнеризації, яка дозволяє упаковувати додатки та їхні залежності в контейнери для забезпечення консистентності середовищ розробки та розгортання.

7. Jenkins: Інструмент Continuous Integration та Continuous Deployment, який надає гнучкі можливості конфігурації та інтеграцію з різними іншими інструментами.

Ці інструменти та технології допомагають розробникам забезпечити ефективну та автоматизовану розробку, тестування та розгортання Win32 десктопних додатків [11].

Збереження документів у хмарному сховищі з використанням Minio. Збереження документів є важливою складовою багатьох десктопних додатків, включаючи Win32 додатки. Один з найпоширеніших підходів до збереження даних — використання хмарних сховищ. Minio — це відкрите програмне забезпечення, яке надає об'єктове сховище, сумісне з Amazon S3, і може бути використано для збереження документів у хмарному середовищі.

Основні переваги використання Minio для збереження документів у хмарному сховищі включають:

1. **Масштабованість:** Minio дозволяє легко масштабувати сховище даних в залежності від потреб вашого додатку. Ви можете почати з невеликої конфігурації та збільшувати ресурси по мірі зростання обсягу даних.

2. **Надійність:** Minio надає можливість реплікації даних для забезпечення надійності та доступності. Ви можете налаштувати кілька копій даних для автоматичного відновлення в разі втрати даних.

3. **Безпека:** Minio підтримує шифрування даних в спокої (at-rest) та шифрування даних в русі (in-transit), що дозволяє забезпечити конфіденційність та цілісність даних.

4. **Простота інтеграції:** Minio забезпечує API сумісне з Amazon S3, що робить його легко інтегрованим з багатьма додатками та сервісами, які підтримують роботу з Amazon S3.

Додавання можливостей збереження документів у хмарному сховищі, такому як Minio, до вашого Win32 десктопного додатку дозволить забезпечити ефективне та надійне збереження даних користувачів [13].

Висновки

У роботі розглянуто різноманітні аспекти автоматизації розробки Win32 десктопних додатків та можливість збереження вхідних і вихідних даних у хмарному сховищі з використанням Minio. Ці практики та інструменти дозволяють розробникам ефективно керувати розробкою, тестуванням, розгортанням та збереженням даних додатків.

Першим кроком у напрямку автоматизації розробки Win32 десктопних додатків є використання Continuous Integration (CI) та Continuous Deployment (CD) для автоматизованої збірки, тестування та розгортання змін. Це дозволяє розробникам швидко та надійно впроваджувати новий функціонал та виправлення помилок.

Потім була розглянута важливість автоматизованого тестування для забезпечення якості та стабільності Win32 десктопних додатків. Автоматизовані тести дозволяють виявляти та виправляти помилки на ранніх етапах розробки, зменшуючи час та зусилля, необхідні для виправлення недоліків.

Також розглянуто необхідність використання Інфраструктури як коду (IaC) для управління середовищами розробки та забезпечення їхньої консистентності та ефективності.

Розглянуто можливості збереження документів у хмарному сховищі за допомогою Minio. Цей підхід дозволяє забезпечити безпеку, масштабованість та надійність збереження даних додатків у хмарному середовищі.

В цілому, автоматизація розробки та збереження даних у хмарному сховищі є важливими компонентами сучасної розробки десктопних додатків, що допомагають розробникам забезпечити швидку, надійну та якісну розробку програмного забезпечення.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Voggenreiter, M., Angermeir, F., Moyón, F., Schöpp, U., & Bonvin, P. Automated Security Findings Management: A Case Study in Industrial DevOps. *arXiv preprint*, 2024. [Електронний ресурс] — режим доступу до ресурсу: <http://arxiv.org/abs/2401.06602v1>.
2. Duque Anton, S., Fraunholz, D., Krohmer, D., et al. Creating it from SCRATCH: A Practical Approach for Enhancing the Security of IoT-Systems in a DevOps-enabled Software Development Environment. *arXiv preprint*, 2020. [Електронний ресурс] — режим доступу до ресурсу: <http://arxiv.org/abs/2010.14865v1>.
3. Alenezi, M., Zarour, M., & Akour, M. Can Artificial Intelligence Transform DevOps? *arXiv preprint* 2022. [Електронний ресурс] — режим доступу до ресурсу: <http://arxiv.org/abs/2206.00225v1>.
4. Luz, W. P., Pinto, G., & Bonifácio, R. Building a Collaborative Culture: A Grounded Theory of Well Succeeded DevOps Adoption in Practice. *arXiv preprint*, 2018. [Електронний ресурс] — режим доступу до ресурсу: <http://arxiv.org/abs/1809.05415v1>.
5. Chris Sells "Windows Forms Programming in C# (Microsoft .NET Development Series)" "Addison-Wesley Professional, 2004.
6. Paul M. Duvall, Steve Matyas, Andrew Glover. "Continuous Integration: Improving Software Quality and Reducing Risk." Addison-Wesley Professional, 2007.
7. Jez Humble, David Farley. "Continuous Delivery: Reliable Software Releases through Build, Test, and Deployment Automation." Addison-Wesley Professional, 2010.
8. Mark Fewster, Dorothy Graham. "Software Test Automation." Addison-Wesley, 1999.
9. Kief Morris. "Infrastructure as Code: Managing Servers in the Cloud." O'Reilly Media, 2016.
10. Yevgeniy Brikman. "Terraform: Up & Running: Writing Infrastructure as Code." O'Reilly Media, 2019.
11. Lorin Hochstein, Rene Moser. "Ansible: Up and Running: Automating Configuration Management and Deployment the Easy Way." O'Reilly Media, 2017.
12. Ed Wilson. "Windows PowerShell Desired State Configuration Revealed." Apress, 2014.
13. MinIO Documentation [Електронний ресурс] — режим доступу до ресурсу: <https://min.io/docs/minio/linux/index.html>

Received 10.01.2025.

Accepted 13.01.2025.

Automation of development of Win32 desktop applications:

Practical approaches and strategies

The article presents a comprehensive analysis of modern approaches to automating the development of Win32 desktop applications using DevOps practices. Given the complexity and growing requirements of desktop applications in today's software industry, automation becomes an essential part of the development process. The article examines key phases such as Continuous Integration (CI) and Continuous Deployment (CD), which are vital for streamlining the development lifecycle by automating builds, tests, and deployments. These practices help developers reduce the time spent on manual operations and mitigate the risk of human errors.

The Continuous Integration section explores the benefits of setting up automated pipelines that compile and build applications whenever new code is committed. Automated tests are run as part of this process to ensure that changes do not introduce bugs or regressions. Continuous Deployment strategies are discussed in detail, with a focus on conditional deployment techniques that allow for gradual rollouts to production environments, ensuring stability and performance.

Automated testing plays a central role in maintaining the quality and stability of Win32 desktop applications. This paper highlights different types of testing, including unit tests, functional tests, performance tests, and GUI-based tests. The integration of these tests into CI/CD pipelines enables continuous validation of the application throughout its lifecycle, ensuring that any issues are detected early and resolved promptly.

Infrastructure as Code (IaC) is another crucial topic discussed in the article. The concept of IaC allows development teams to automate the creation, configuration, and management of the infrastructure needed for the development and deployment of Win32 applications. The paper provides an overview of popular IaC tools such as Terraform, Ansible, and PowerShell DSC, detailing how they can be used to standardize and automate the provisioning of environments across development, testing, and production stages. This automation contributes to increased consistency, repeatability, and efficiency in managing infrastructure.

In addition to automation in development and deployment, the article addresses the importance of cloud-based storage solutions for Win32 applications. Minio, an open-source, S3-compatible object storage system, is examined as a viable option for storing documents and application data in the cloud. The paper discusses Minio's scalability, reliability, and security features, emphasizing its role in providing efficient, secure, and resilient data storage for desktop applications.

Overall, the article outlines how the adoption of DevOps practices, such as CI/CD, automated testing, IaC, and cloud storage solutions, can significantly improve the development process of Win32 desktop applications. By reducing manual intervention and providing robust automation, these practices help teams increase their productivity, ensure higher software quality, and accelerate time-to-market.

This article is targeted at software developers, DevOps engineers, and technical professionals interested in improving their knowledge of automation strategies and applying them to desktop application development. The provided insights and tools offer practical guidance for

leveraging DevOps methodologies to streamline workflows and enhance the efficiency of Win32 application development.

Keywords: software engineering, development automation, DevOps, Continuous Integration (CI), Continuous Deployment (CD), infrastructure as code, automated testing, Terraform, Ansible, PowerShell DSC, Minio, document storage in the cloud, cloud storage, deployment, Windows, cloud technologies.

Ганжа Андрій Сергійович – аспірант 3-го року навчання Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Антоненко Світлана Валентинівна – кандидат технічних наук, доцент Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Hanzha Andrii - 3rd year postgraduate student at Oles Honchar Dnipro National University.

Antonenko Svitlana Valentynivna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor at Oles Honchar Dnipro National University.

SEGMENTATION OF GRAYSCALE LOW-CONTRAST IMAGES USING FUZZY TRANSFORMS OF TYPE-2

Annotation. Segmentation of low-contrast grayscale images is a rather complex task due to the lack of a priori information about the location and characteristics of objects of interest that can be compared with noise. To solve this problem, various fuzzy algorithms based on the processing of membership functions to fuzzy sets describing the analyzed properties are currently often used. The paper proposes the algorithm for segmenting halftone images based on the iterative application of type-1 and type-2 fuzzy transformations. The presented algorithm provides sufficient image segmentation for visual analysis, without allowing excessive detailing, and has a small number of control parameters that do not require lengthy tuning. Unlike the fuzzy clustering algorithms, it does not use the fuzzy cluster center matrix, which reduces the computational load. Experimental results are presented on the example of real grayscale medical images segmentation.

Keywords: low-contrast images, fuzzy methods, visual analysis, membership function, segmentation, fuzzy sets of type-1, fuzzy sets of type-2.

Introduction. Fuzzy sets are currently used to solve a variety of problems in various areas of human activity, in particular, in image processing, in which inaccuracy and uncertainty are always present [1, 2].

One of the most challenging tasks in digital image processing is the segmentation process. Its implementation is complicated by the ambiguity associated with the image formation system, as well as the need to identify low-contrast objects or anomalies comparable to noise, about the nature, quantity, location and shape of which there is no a priori information [3].

Statement of the problem. The purpose of this article is to demonstrate the information capabilities of a new method for segmenting grayscale low-contrast images, which is based on the iterative application of fuzzy transformations of type-1 and type-2, which ensures an increase in its sensitivity and reliability.

Analysis. Traditionally, the transition to a fuzzy space (fuzzification) is carried out on the basis of the image initial brightness levels transformation into membership functions to fuzzy sets. Currently, effective methods for improving image quality based on transformations in fuzzy space have been developed [10].

In 1981, Bezdek proposed the fuzzy C-Means (FCM) clustering algorithm [4], which can be interpreted as a fuzzification process, since it generates a set of fuzzy membership functions (equal to the number of fuzzy clusters) that can be used to solve various problems,

including image segmentation [5]. This algorithm provides automatic formation of a new multi-dimensional space of features describing objects of the subject area, allowing to take into account the uncertainty present in the initial data. The images always contain the ambiguity of grey, geometric fuzziness, and uncertainty of knowledge.

The concept of a type-2 fuzzy set was introduced by Zade [6], and Rhee and Hwang [5] presented a modification of the T2FCM fuzzy clustering algorithm using type-2 fuzziness to clarify the location of cluster centers (centroids). This approach is currently being actively developed and is often used to solve various problems [7, 8].

Disadvantages of the FCM algorithm include sensitivity to noise, uncertainty of initial parameters (fuzzification parameter and number of clusters), as well as ambiguity of the defuzzification stage.

Determining the number of fuzzy clusters in some cases is difficult due to the lack of a priori information about the subject area and causes the need to tune this value when solving specific problems. In [9], the algorithm is presented that allows you to automatically determine the optimal number of clusters, however, it is still necessary to set an initial value to start its work.

The matrix of centroids usage is necessary precisely when solving the task of fuzzy clustering, and segmentation is considered as a result of the visualization of its results. However, the matrix of centroids during segmentation is not considered critically important and is used primarily because it is required by the clustering algorithm.

Fuzzy transformations, which calculate the fuzzy membership function based on the original image, can also be used to improve image quality [10]. The application of such transformations, in principle, allows solving the task of segmentation, however, the iterative process of changing the membership function used by clustering algorithms, which allows you to control the detailing during segmentation, is not assumed.

The main part. The segmentation algorithm proposed in this paper operates with fuzzy membership functions of type-1 (MFT1) and type-2 (MFT2) and is iterative, which allows you to control the degree of its detail. However, this algorithm, unlike the FCM method and its modifications, does not use the matrix of centroids in principle, which simplifies the computational process. The stopping criteria are the specified error during training (it describes the change of fuzzy membership functions at different iterations), as well as the maximum number of iterations.

MFT1 is initially calculated on the basis of input data, and is not formed randomly, as in the basic FCM algorithm. The calculation of MFT2 is carried out on the basis of the difference of the "upper" u_h and "lower" u_l MFT1 (Fig. 1), which allow to fully describe the blur of the MFT1 (FOU – the footprint of uncertainty).

The algorithm of the method proposed in this paper contains the following steps:

1. Scaling the input halftone image to the range $[0,1]$.
2. Calculating the initial value of a MFT1 matrix u^0 (its dimension is $x_{\max} \times y_{\max}$ the same as for the input image) based on the scaled image using the following formulas:

$$C_1 = C_{\mu} + 0.6 - \bar{I}, \quad (2)$$

3. Calculating the current MFT2 matrix (a^t), the dimension of which is the same as that of the original image, is based on the difference of the "upper" u_h^t and "lower" u_l^t membership functions of the current iteration according to the following formulas:

$$\left(u_{h2}^t\right)_{x, y}=\left(u^t\right)_{x, y}^{K+0.75+\overline{u^t}}^{1 / 2}, \quad(5)$$

$$\left(u_{l2}^t\right)_{x,y} = \left(\left(u^t\right)_{x,y}\right)^{K+1.25+\left(\overline{u^t}\right)^1/2}, \quad (6)$$

$$\left(\overline{u^t}\right)^1 = \left(\overline{u^t}\right)^{1-\max\left(\overline{u^t}, 1-\overline{u^t}\right)}, \quad (7)$$

$$\left(u_h^t\right)_{x,y} = \left(\left(u_{h1}^t\right)_{x,y} + \left(u_{h2}^t\right)_{x,y}\right)/2, \quad (8)$$

$$\left(u_l^t\right)_{x,y} = \left(\left(u_{l1}^t\right)_{x,y} + \left(u_{l2}^t\right)_{x,y}\right)/2, \quad (9)$$

where $\overline{u^t}$ is the average of the current matrix MFT1 u^t (on the 1st iteration the matrix u^0 is used, and on the subsequent iterations matrix u^{t-1} is used, which is obtained at the end of the previous iteration), and K is the coefficient, the values of which should be selected in the range $[0,0.2]$, which affects the results of segmentation. It has been experimentally determined that it is most often recommended to select a value from 0.07 to 0.08.

4. Starting from the 2nd iteration of training:

4.1. The value Δ^t is calculated by the formula:

$$\Delta^t = \sum_{x=1}^{x_{\max}} \sum_{y=1}^{y_{\max}} \left| a_{x,y}^t - a_{x,y}^{t-1} \right|, \quad (10)$$

where a^t and a^{t-1} are MFT2 matrices of current and previous iterations, accordingly.

4.2. If the condition is met:

$$\Delta^t \geq \Delta^{t-1}, \quad (11)$$

where Δ^{t-1} is the value calculated by formula (10) at the previous iteration, initially this value is set to a very large number, unattainable in practice, then instead of the current values of the matrices a^t , u_l^t and u_h^t the values (a^{t-1} , u_l^{t-1} and u_h^{t-1} , accordingly) that are remembered at the end of the previous iteration are written, after which the learning process stops (go to step 7). This step prevents the overtraining effect from occurring.

4.3. If the condition is met:

$$\Delta^t < \varepsilon, \quad (12)$$

where ε is the specified learning accuracy, then the learning process also stops (go to step 7).

5. If the condition is met

$$t < t_{\max}, \quad (13)$$

where $t_{\max}$ is the maximum number of iterations, then the matrix value u^{t+1} is calculated, which will be used in the next iteration when calculating the a^t matrix. Matrix u^{t+1} is obtained by the formulas (1) and (2), where instead of the original image a matrix u^t of the current iteration is used, and instead of $\bar{I}$ value $\overline{u^t}$ is used.

6. If condition (13) is met, then the next learning iteration starts (go to step 3).

7. Values of matrices a^t , u_l^t and u_h^t are scaled to the range $[0,1]$.

8. Matrix I^w is calculated by the formulas:

$$I_{x,y}^w = \left(u_h^t\right)_{x,y}^{1-\frac{a_{x,y}^t}{d_{x,y}^t+d_1}} - \left(u_l^t\right)_{x,y}^{1-\frac{a_{x,y}^t}{d_{x,y}^t+d_1}}, \quad (14)$$

$$d_1 = 2 + \overline{u_l^t}, \quad (15)$$

where $\overline{u_l^t}$ is average of u_l^t matrix. The obtained matrix I^w is also scaled to the range $[0,1]$ and is treated as a grayscale image.

9. The output image I^{out} is formed based on the weighted sum according to the formulas:

$$I_{x,y}^{out} = I_{x,y}^h \cdot C_{out} + I_{x,y}^a \cdot (1 - C_{out}), \quad (16)$$

$$C_{out} = (\overline{I^w} + \overline{u_l^t}) / 2, \quad (17)$$

where I^h and I^a are the grayscale images, obtained after applying the histogram equalization and adaptive histogram equalization methods (with a uniform transformation function) to the image I^w , accordingly, and $\overline{I^w}$ is the average of the image I^w .

The experimental results were obtained on the example of processing various medical images, an example of which are the images shown in Fig. 2a, 3a (Fig. 2b and 3b show histograms of these images). Fig. 2a shows a tomogram of the brain, performed for the purpose of diagnosing the presence of a hematoma, as well as determining the area of its influence in case of detection (the rectangle indicates the area of interest). Fig. 3a shows an X-ray image of the cervical spine.

The following parameters were used for segmentation based on the FCM algorithm: $c = 6$, $m = 2$, $\varepsilon = 10^{-5}$, and the maximum number of iterations is 100. The results were visualized based on the maximum of the membership function.

The following control parameters were used when using the proposed method: $C_u = 0.026$, $K = 0.071$, $\varepsilon = 0.035$, the maximum number of iterations is 12 (during the experiments the number of training iterations practically did not exceed 3-4). Visualization of the original image was also carried out after scaling it to the range $[0,1]$ based on the formula (16), when $C_{out} = \overline{I}$.

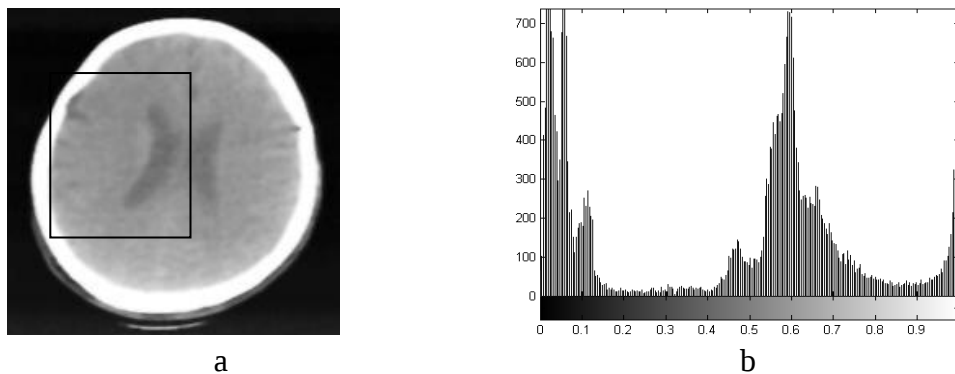


Figure 2 – X-ray tomogram of the brain: a – original grayscale image (204x201);
b – its histogram

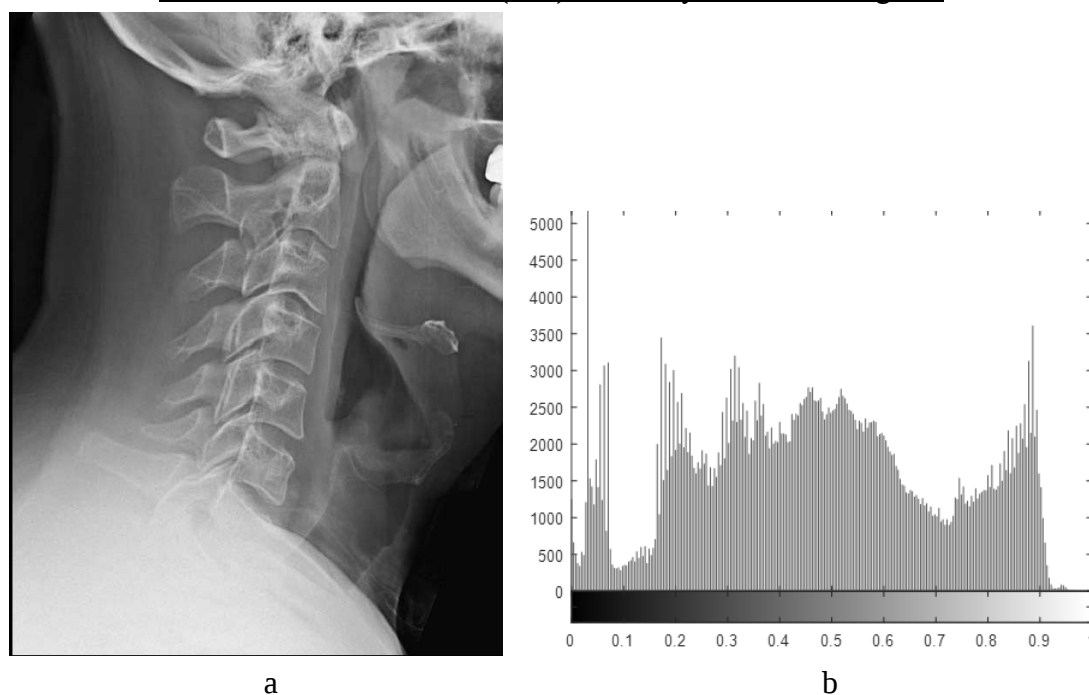


Figure 3 – X-ray image: a – original grayscale image (744x570); b – its histogram

Segmentation of the brain tomogram shown in Fig. 1a based on the FCM algorithm (Fig. 4a) does not allow for a clear identification of the hematoma, and also leads to some excessive detailing: identification of image details that are insignificant for analysis, possibly artifacts. Visualization based on formula (16) of the original image does not allow for a clear identification of the hematoma's influence area (Fig. 4b). At the same time, segmentation based on the proposed algorithm allows for a clear identification of both the hematoma itself and its influence area (Fig. 4c).

Segmentation of the X-ray image shown in Fig. 3a by the proposed method also allows us to clearly highlight the structure of the cervical spine and part of the skull (Fig. 5b), which is poorly distinguishable in the original image. To a lesser extent, the highlighting of the structure of the cervical spine and part of the skull is provided by visualization of the original image based on formula (16), shown in Fig. 5a.

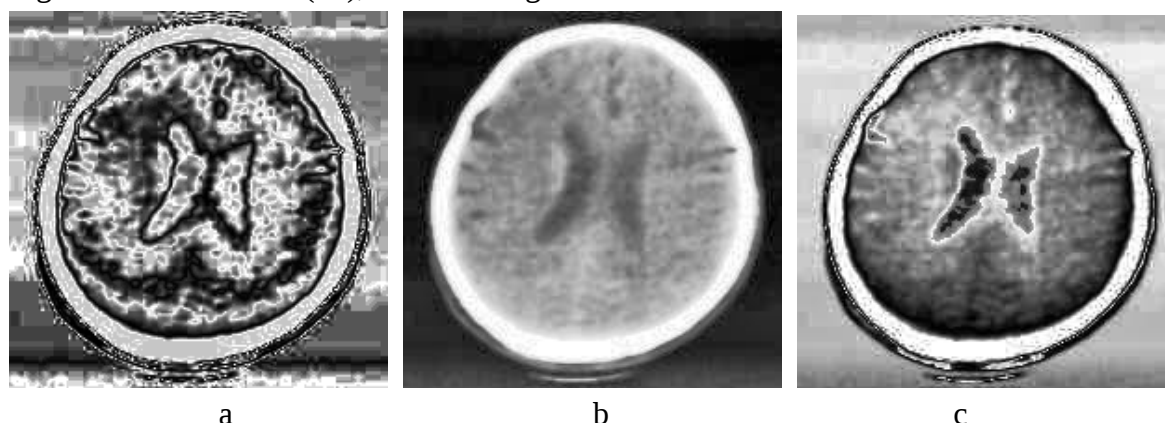


Figure 4 – Segmentation of the brain tomogram (Fig. 2 a): a – FCM; b – visualization of the original image according to formula (16); c – the proposed method

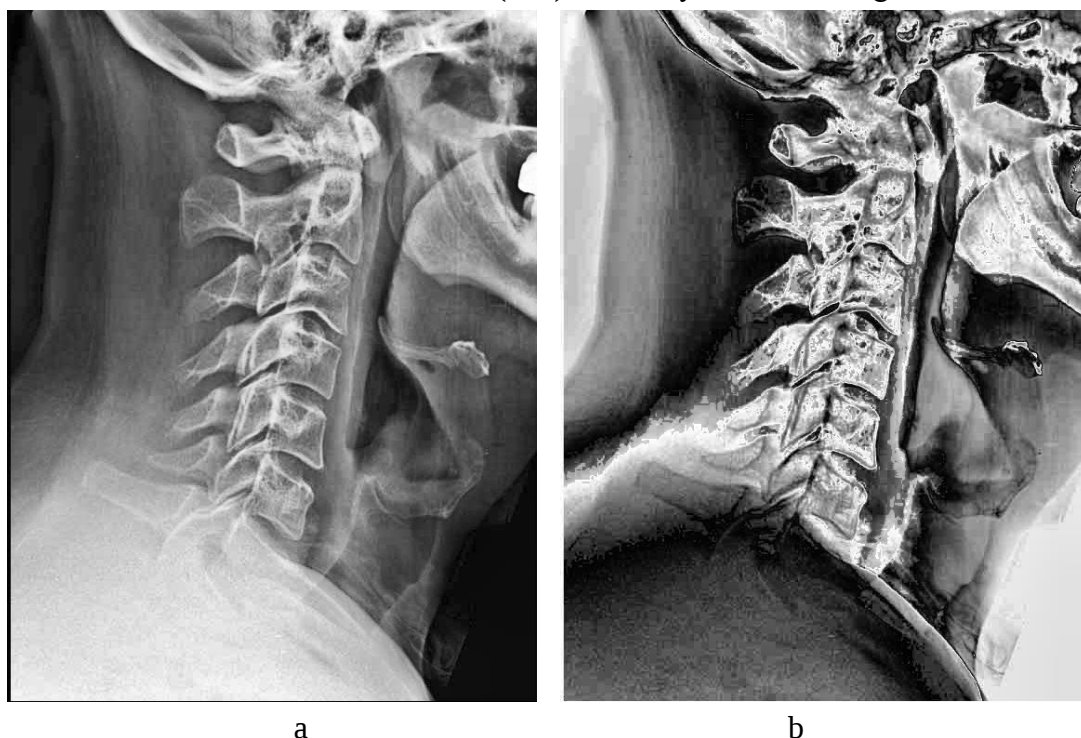


Figure 5 – Segmentation of an X-ray image (Fig. 3a): a – visualization of the original image according to formula (16); b – the proposed method

Conclusions:

- the usage of the proposed method allows us to provide the level of detail necessary for visual analysis, more clearly identify the boundaries of interest and at the same time reduce the appearance of artifacts;
- the proposed algorithm is simpler than FCM and has a small number of control parameters;
- the level of detail is significantly affected by the parameter C_u , which is tuned to process the selected type of images;
- a promising direction for further research is to find ways to automate the tuning of the parameter C_u .

ЛІТЕРАТУРА

1. Пегат А. Нечеткое моделирование и управление / А. Пегат; [пер. с англ. А.Г. Подвессовского, Ю.В. Тюменцева]; под. ред. Ю.В. Тюменцева – М.: БИНОМ, 2009. – 768 с.
2. Chi Z. Fuzzy algorithms: With Applications to Image Processing and Pattern Recognition / Z. Chi, H. Yan, T. Pham – Singapore; – New Jersey; – London; – Hong Kong: Word Scientific, 1998. – 225 p.
3. Форсайт Д., Понс Ж. Компьютерное зрение: современный подход / Д. Форсайт, Ж. Понс; [пер. с англ. А.В. Назаренко, И. Ю. Дорошенко]. – М.; – С.-П.; –К: Вильямс, 2004. – 926 с.
4. Bezdek J. C. A Convergence Theorem for The Fuzzy ISODATA Clustering Algorithms / J. C. Bezdek // IEEE Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence. – 1980. – Vol.

2, – № 1. – P. 1 – 8.

5. Rhee F.C.H. A type-2 fuzzy C-means clustering algorithm / F.C.H. Rhee, C. Hwang // IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference – 2001. – Vol. 4. – P. 1926 – 1929.

6. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning / L.A. Zadeh // Inf. Sci. – 1975. – Vol 8. – P. 199 – 249.

7. Aneja Deepali Fuzzy Clustering Algorithms for Effective Medical Image Segmentation / Deepali Aneja, Tarun Kumar Rawat // International Journal of Intelligent Systems and Applications. – 2013. Vol. 5(11). – P. 55 – 61.

8. Akhmetshina L. Improvement of Grayscale Images in Orthogonal Basis of the Type-2 Membership Function / L. Akhmetshina, A. Yegorov // CMIS-2021: The Fourth International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems, April 27, 2021, Zaporizhzhia. – P. 465 – 474.

9. Егоров А. Оптимизация характеристик яркости на основе нейро-фаззи технологий / А. Егоров, Л. Ахметшина // Монография. Ламберт. – 2015. – 139 с.

Hassanien A. A comparative study on digital mammography enhancement algorithms based on fuzzy theory / A. Hassanien, A. Badr // Studies in Informatics and Control. – 2003. – Vol. 12., № 1. – P. 1 – 31.

REFERENCES

1. Pegat A. Nechetkoye modelirovaniye i upravleniye / A. Pegat; [per. s angl. A.G. Podvesovskogo, YU.V. Tyumentseva]; pod. red. YU.V. Tyumentseva – M.: BINOM, 2009. – 768 s.

2. Chi Z. Fuzzy algorithms: With Applications to Image Processing and Pattern Recognition / Z. Chi, H. Yan, T. Pham – Singapore; – New Jersey; – London; – Hong Kong: Word Scientific, 1998. – 225 p.

3. Forsayt D., Pons J. Komp'yuternoye zreniye: sovremennyy podkhod / D. Forsayt, J. Pons; [per. s angl. A.V. Nazarenko, I. YU. Doroshenko]. – M.; – S.-P.; –K: Vil'yams, 2004. – 926 s.

4. Bezdek J. C. A Convergence Theorem for The Fuzzy ISODATA Clustering Algorithms / J. C. Bezdek // IEEE Transaction On Pattern Analysis And Machine Intelligence. – 1980. – Vol. 2, – № 1. – P. 1 – 8.

5. Rhee F.C.H. A type-2 fuzzy C-means clustering algorithm / F.C.H. Rhee, C. Hwang // IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference – 2001. – Vol. 4. – P. 1926 – 1929.

6. Zadeh L.A. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning / L.A. Zadeh // Inf. Sci. – 1975. – Vol 8. – P. 199 – 249.

7. Aneja Deepali Fuzzy Clustering Algorithms for Effective Medical Image Segmentation / Deepali Aneja, Tarun Kumar Rawat // International Journal of Intelligent Systems and Applications. – 2013. Vol. 5(11). – P. 55 – 61.

8. Akhmetshina L. Improvement of Grayscale Images in Orthogonal Basis of the Type-2 Membership Function / L. Akhmetshina, A. Yegorov // CMIS-2021: The Fourth International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems, April 27, 2021, Zaporizhzhia. – P. 465 – 474.

9. Yegorov A. Optimizatsiya yarkosti izobrazheniy na osnove neyro-fazzi tekhnologiy / A. Yegorov, L. Akhmetshina // Monografiya. Lambert. – 2015. – 139 P.
10. Hassanien A. A comparative study on digital mammography enhancement algorithms based on fuzzy theory / A. Hassanien, A. Badr // Studies in Informatics and Control. – 2003. – Vol. 12., № 1. – P. 1 – 31.

Received 14.01.2025.

Accepted 16.01.2025.

**Сегментація напівтонових слабкоконтрастних зображень
на основі застосування нечітких перетворень типу-2**

В роботі запропоновано алгоритм сегментації напівтонових зображень на основі ітеративного застосування нечітких перетворень типу-1 та типу-2, що забезпечує необхідну деталізацію результуючих зображень для візуального аналізу, запобігаючи при цьому передеталізації, має невелику кількість керуючих параметрів, та, на відміну від алгоритмів нечіткої кластеризації типу FCM, не використовує матрицю центрів, що спрощує розрахунки. Наведено експериментальні результати на прикладі сегментації запропонованим алгоритмом реальних напівтонових медичних зображень.

Ключові слова: слабкоконтрастні зображення, нечіткі методи, візуальний аналіз, функція приналежності, сегментація, нечіткі множини типу-1, нечіткі множини типу-2.

Ахметшина Людмила Георгіївна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара.

Єгоров Артем Олександрович – старший викладач кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій, Дніпровський національний університет ім. О. Гончара.

Akhmetshina Liudmyla Georgievna – Doctor of Technical Sciences, professor, professor of the department of electronic computers, Oles Honchar Dnipro National University.

Yegorov Artyom Alexandrovich – Senior Lecturer of Computer Science and Information Technologies Department, Oles Honchar Dnipro National University.

АНАЛІЗ OPEN-SOURCE ЗАСОБІВ ДЛЯ ЗАХИСТУ РЕСУРСІВ У ХМАРНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Анотація. Хмарні середовища стають невід'ємною частиною інфраструктури багатьох компаній через свою гнучкість, доступність та ефективність. Проте через свою динамічну природу вони створюють нові загрози безпеці даних, тому потребують окремих засобів для боротьби з ними. У статті проведено порівняння існуючих open source засобів для захисту хмарних середовищ: Checkov, Falco, Keycloak. Розглядаються їх недоліки та переваги, на основі їх аналізу зроблені висновки, що існує потреба у створенні більш досконалих засобів захисту хмарних середовищ.

Ключові слова: хмарні середовища, кібербезпека, програмне забезпечення, open source software, розподілені системи, Checkov, Falco, CSPM, CWPP.

Постановка проблеми

За даними Міжнародної корпорації даних (IDC), глобальний публічний хмарні послуги та інвестиції в інфраструктуру розширилися з 229 мільярдів доларів у 2019 році до 500 мільярдів доларів у 2023 році [1]. Ринок швидко розвивається завдяки збігу факторів: великі підприємства усвідомлюють трансформаційну силу хмарних обчислень, адже завдяки переходу в хмару вони можуть оптимізувати свою інфраструктуру, покращити її стабільність та ефективність, що призводить до підвищення продуктивності всієї організації. Проте зі зростанням популярності хмарних середовищ також відбувається їх постійним розвиток: з'являються нові послуги, вже існуючі оновлюються або замінюються іншими, через що постійно зростає і складність підтримки систем, що використовують ці середовища. Саме ця складність підтримки та розподілена природа подібних систем створюють нові виклики для захисту даних та ресурсів у хмарних середовищах [2]. Так у 2022 середні збитки від витоку даних з хмарних середовищ склали \$ 4.35 млн, а кількість загроз зросла на 38% в період з 2022 по 2023 роки [3]. Це робить вибір відповідних засобів для захисту хмарних середовищ важливим кроком для підприємств, що доволі часто обирають програмне забезпечення з відкритим кодом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У роботі [4] визначено основні виклики у захисті хмарних середовищ та аналізують існуючі методи їх подолання. Зазначено, що існує декілька аспектів, що ускладнюють використання наведених методів:

- інтеграція з існуючою інфраструктурою;
- потреби в додаткових фінансових та людських ресурсах;

– відмінності у моніторингу та контролі хмарних середовищ.

Також автори наводять перелік вразливостей, що є найбільш характерними для хмарних середовищ.

Автори [5–6] відзначають важливість систем управління обліковими даними(IAM) у забезпеченні цілісності даних у хмарних середовищах. Проте автори також вказують на складність підтримки подібних систем через постійну потребу в актуалізації даних та необхідність у ретельному контролі прав, що надаються користувачам.

У роботі [7] розглянуто вплив програмного забезпечення з відкритим кодом на галузь кібербезпеки. Одним з висновків є те, що, хоча програмне забезпечення з відкритим кодом робить великий внесок у захист даних та інформаційних систем, воно не є універсальним засобом. Адже різні організації мають різні потреби та обмеження, що можуть унеможливлювати використання подібного програмного забезпечення.

Мета дослідження. Метою дослідження є виявлення їх переваг та недоліків, що дозволяє зробити висновки стосовно поточних тенденцій у сфері захисту хмарних середовищ

Переваги програмного забезпечення з відкритим кодом. Програмне забезпечення з вихідним кодом, доступним для громадськості, відоме як програмне забезпечення з відкритим кодом. Воно надає користувачам можливість змінювати та вдосконалювати вихідний код відповідно до своїх потреб. Таке програмне забезпечення не захищається авторським правом, і користувачі можуть отримати вихідний код і змінити його за потреби. Подібна модель розвитку створює певні переваги, що роблять програмне забезпечення з відкритим кодом привабливим для бізнесу:

– Ціна – більшість програмного забезпечення з відкритим кодом, доступне безкоштовно.

– Швидкість розвитку – проекти з відкритим кодом створюються людьми з різними культурами та точками зору, що працюють на вирішенні спільної проблеми, тому такі проекти доволі часто мають вищу якість, ніж комерційне програмне забезпечення. Нові функції в цих проектах також публікуються часто і швидко завдяки цій груповій стратегії співпраці.

– Стабільність – оскільки над одним проектом працюють тисячі людей, дрібні недоліки швидко усуваються.

– Безпека – відкритість коду дозволяє будь-кому проаналізувати його на потенційні загрози та виправити їх за потреби, що робить подібні додатки безпечнішими у використанні.

Checkov. Checkov – це інструмент, що реалізує CSPM (Cloud Security Posture Management) процес, що дозволяє перевіряти конфігурацію хмарної інфраструктури на поширені проблеми безпеки та відповідності. До таких проблем можуть відноситись незашифровані сегменти зберігання даних, відсутність ключів шифрування або їх ротації. Це дозволяє уникнути наступних ризиків:

- Проблеми відповідності – стандарти відповідності забезпечують оптимальність конфігурацій для підтримки безпеки хмари. Однак розробники можуть не помічати ці стандарти, через що інфраструктура буде вразливою до різноманітних загроз і проблем.

- Порушення безпеки – у хмарній системі можуть бути певні помилки та неправильні конфігурації в коді, якими можуть скористатися зловмисники. Через це можуть виникнути такі проблеми, як викрадення даних, відмова системи.

- Ненавмисні ризики – зазвичай компанії намагаються врахувати навмисні атаки зловмисників на свою систему, але можуть не помічати ненавмисних проблем, таких як вразливість конфіденційних даних. Без інструментів CSPM цей тип ризику неможливо помітити, усунути та вирішити.

- Відсутність розуміння інциденту – через відсутність периметра та централізації порівняно з локальними системами організаціям важко знайти причину інциденту. Отже, вони погано підготовлені для того, щоб зрозуміти, як стався інцидент і його наслідки.

- Серед переваг Checkov можна виділити:

- Допомога в усуненні помилок – при виявленні помилок або загроз безпеці у конфігурації Checkov надає інструкції з їх усунення.

- Інтеграція у CI/CD процеси автоматизує процес виявлення неправильних конфігурацій у хмарі, які можуть призвести до помилок і порушень безпеки в хмарній інфраструктурі компанії.

- Підтримка популярних Infrastructure As Code(IaC) фреймворків

- Пропонує єдину інформаційну точку для різних хмарних середовищ і облікових записів, що дозволяє розробникам у будь-який момент мати видимість того, що відбувається у хмарі.

- Проте CSPM(а отже і Checkov) має свої недоліки, основними серед яких є:

- CSPM не може виправити всі неправильні налаштування – інструменти CSPM зазвичай ефективно виявляють проблеми конфігурації, але вони не завжди можуть виправити неправильну конфігурацію, коли її знаходять, що не дозволяє повністю автоматизувати цей процес.

- Постійний моніторинг неправильних конфігурацій корисний для виявлення проблем відповідності та ризиків, таких як відкриті порти, проблеми з ключами шифрування. Однак проблеми з неправильною конфігурацією становлять лише долю ризиків для безпеки хмарних середовищ. Адже багато кібератак тривають і передбачають складну послідовність подій, а не одноразову аномалію. Інструменти CSPM не відстежують середовище виконання, тому вони не можуть визначити підозрілу поведінку, як-от незрозуміле сплеск активності в мережі.

- Забезпечення відповідності не гарантує безпеки - потреби організації в конфігурації можуть змінюватися, як і вимоги до відповідності, тому команди безпеки та розробки повинні враховувати нові ризики. Інструменти CSPM не надають сповіщень про порушення, які прослизують через існуючі правила.

– Безпека вимагає комбінованого статико-динамічного підход – інструменти CSPM є статичними за своєю природою — вони відстежують середовище конфігурації під час аналізу на певний момент часу, тому не враховують вплив невеликих змін у часі, які згодом можуть створити загрозу безпеці усієї системи.

– CSPM інструменти іноді можуть генерувати помилкові спрацьовування, що може призвести до втрати часу та ресурсів на розслідування неіснуючих загроз [8].

Falco. Falco – це інструмент, що допомагає реалізувати CWPP (Cloud Workload Protection Platform) процес шляхом всебічного спостереження за додатками та інфраструктурою та аналізу їх продуктивності. Його основними перевагами є:

– Платформа автоматично виявляє загрози та надає засоби для запобігання атакам. Falco може виявити аномалії та відстежувати події в режимі реального часу, що робить його потужним інструментом для забезпечення безпеки.

– Falco допомагає компаніям дотримуватися вимог різних регуляторів, надаючи інструменти для аудиту та створення звітів про безпеку.

– Підтримка AWS, Google Cloud, Azure та інших хмарних служб робить Falco універсальним рішенням для компаній, що працюють у хмарних середовищах.

До недоліків даного інструменту можна віднести:

● Складнощі в інтеграції: Falco потребує встановлення агента для кожного компоненту системи. Враховуючи надзвичайно динамічну, розподілену та ефемерну природу хмари, фактично неможливо встановити агента на кожний компонент системи[9] (не кажучи вже про те, що існує багато ОС, і не всі з них можуть підтримуватися агентами), що може призвести до погіршення якості моніторингу системи в цілому.

– Відсутність інформації про площину керування: Falco охоплює лише робочі навантаження, вони не пропонують жодної інформації про площину керування.

– Неефективна пріоритезація сповіщень: Falco не має доступу до хмари в повному обсязі та не може визначити пріоритетність сповіщень на основі контексту середовища.

– Зловмисники часто намагаються спочатку закріпитися в хмарному середовищі, а потім рухаються до своєї фактичної цілі. Через відсутність уявлення про конфігурації хмари Falco може знаходити аномалії лише в робочих навантаженнях, а не на рівні хмарної інфраструктури, що потенційно залишає відкритими важливі вектори атак.

Keycloak. Keycloak – це open source рішення для ідентифікації користувачів та керування доступом, що вирішує наступні задачі:

– Керування доступом: дозволяє керувати доступом до різних додатків та ресурсів, налаштувати політики доступу та ролі користувачів, щоб забезпечити безпечний доступ до даних.

– Автентифікація користувачів: забезпечує безпеку програмних продуктів та даних, оскільки доступ до них буде дозволено тільки авторизованим користувачам.

– Авторизація: Keycloak дозволяє визначати ролі кожного користувача, за допомогою яких стає можливим обмежити доступ користувачів до певних сервісів або даних, що зменшує ризик їх витоку.

До переваг Keycloak можна віднести:

- Безпека відповідно до галузевих стандартів: Keycloak підтримує два основних протоколи – SAML2 і Open ID Connect (OIDC), що забезпечують безпечний і стандартизований зв'язок між різними службами, що спрощує інтеграцію в існуючу інфраструктуру.

- Функції єдиного входу (SSO): Ключовою особливістю Keycloak є можливість єдиного входу, що значно покращує взаємодію з користувачами, адже це дозволяє їм отримати доступ до різних сервісів за допомогою одного набору облікових даних.

- Гнучка інтеграція постачальників ідентифікаційних даних: Keycloak забезпечує легку інтеграцію з кількома постачальниками ідентифікаційних даних (IDP), дозволяючи організаціям використовувати наявну інфраструктуру. Це спрощує автентифікацію користувачів і полегшує керування ідентифікацією користувачів у різних службах.

- Надійні функції безпеки: Keycloak підтримує двофакторну автентифікацію (2FA), включаючи такі методи, як одноразові паролі (OTP), ключі доступу FIDO2 з біометричною автентифікацією та інтеграцією смарт-карт [10].

Незважаючи на всі переваги, Keycloak має суттєві обмеження, що не дозволяє назвати його універсальним інструментом для забезпечення безпеки даних та інфраструктури:

- Масштабованість із високим навантаженням: працювати з Keycloak при високих навантаженнях може бути складно. У таких сценаріях необхідний комплексний аналіз, щоб забезпечити роботу з оптимізації ресурсів.

- Складність налаштування: хоча Keycloak пропонує можливість розширення за допомогою плагінів, інтеграція з деякими системами може потребувати значних ресурсів. Крім того, подібні інтеграції можуть мати ненавмисні або пізно виявлені впливи на продуктивність і безпеку.

- Вразливість до компрометування облікових даних: якщо зловмисники отримають доступ до облікових даних одного з користувачів, це наражає систему на небезпеку, адже може пройти доволі багато часу перш ніж це буде виявлено.

Висновки

В роботі розглянуті популярні open source інструменти для захисту хмарних середовищ. Приведені їх особливості, переваги та недоліки. Як можна побачити, існує велика кількість програмного забезпечення з відкритим кодом, що може бути використано для захисту даних та інфраструктури у хмарних середовищах. Проте кожне з наведених рішень має свої недоліки, що робить їх вразливими для певних видів атак та не дозволяє назвати їх універсальними. Через це виникає потреба в розгортанні та підтримці одразу декількох інструментів, що призводить до ускладнення систем в цілому та збільшує витрати на них. Також ускладнення системи може створити нові неочевидні вектори атак. Це демонструє потребу у створенні більш досконалих та універсальних засобів, що зможуть спростити процес захисту хмарних середовищ.

ЛІТЕРАТУРА

1. R. Kumar and R. Goyal, "On cloud security requirements, threats, vulnerabilities and countermeasures: A survey," Computer Science Review, vol. 33, pp. 1–48, 2019.

2. Hassan Takabi and James B.D. Joshi, University of Pittsburgh, Gail –Joon and Ahn Arizona State University, “Security and Privacy Challenges in Cloud Computing Environments”, IEEE security and privacy, www.computer.org/security, 2010, pp. 24 – 31
3. The Latest 2024 Cyber Crime Statistics [Електронний ресурс] - 2024. - Режим доступу до ресурсу: <https://aag-it.com/the-latest-cyber-crime-statistics/>
4. Chauhan, Milan & Shiaeles, Stavros. (2023). An Analysis of Cloud Security Frameworks, Problems and Proposed Solutions. Network. 3. 422-450. 10.3390/network3030018.
5. Mogos, Gabriela. (2019). Cloud Security. Critical analysis. International Journal of Computer Science and Information Security,. 17. 51-54.
6. Singh, Chetanpal & Thakkar, Rahul & Warraich, Jatinder. (2023). IAM Identity Access Management—Importance in Maintaining Security Systems within Organizations. European Journal of Engineering and Technology Research. 8. 30-38. 10.24018/ejeng.2023.8.4.3074.
7. Doinea, Mihai. (2010). Open Source Security Tools. Open Source Science Journal. 2.
8. International Journal of Scientific Research in Computer Science, E., & IJSRCSEIT, I. T. (2020). CSPM- Cloud Security Posture Management (Comprehensive Security for Cloud Environment). International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. <https://doi.org/10.32628/CSEIT206268>
9. Yadav, Baleshwar & Sharma, Mansi. (2023). Cloud Workload Protection Platform Market.
10. D., Divyabharathi & Cholli, Nagaraj. (2020). A Review on Identity and Access Management Server (KeyCloak). International Journal of Security and Privacy in Pervasive Computing. 12. 46-53. 10.4018/IJSPPC.2020070104.

REFERENCES

1. R. Kumar and R. Goyal, “On cloud security requirements, threats, vulnerabilities and countermeasures: A survey,” Computer Science Review, vol. 33, pp. 1–48, 2019.
2. Hassan Takabi and James B.D. Joshi, University of Pittsburgh, Gail –Joon and Ahn Arizona State University, “Security and Privacy Challenges in Cloud Computing Environments”, IEEE security and privacy, www.computer.org/security, 2010, pp. 24 – 31
3. The Latest 2024 Cyber Crime Statistics [Електронний ресурс] - 2024. - Режим доступу до ресурсу: <https://aag-it.com/the-latest-cyber-crime-statistics/>
4. Chauhan, Milan & Shiaeles, Stavros. (2023). An Analysis of Cloud Security Frameworks, Problems and Proposed Solutions. Network. 3. 422-450. 10.3390/network3030018.
5. Mogos, Gabriela. (2019). Cloud Security. Critical analysis. International Journal of Computer Science and Information Security,. 17. 51-54.
6. Singh, Chetanpal & Thakkar, Rahul & Warraich, Jatinder. (2023). IAM Identity Access Management—Importance in Maintaining Security Systems within Organizations. European Journal of Engineering and Technology Research. 8. 30-38. 10.24018/ejeng.2023.8.4.3074.
7. Doinea, Mihai. (2010). Open Source Security Tools. Open Source Science Journal. 2.
8. International Journal of Scientific Research in Computer Science, E., & IJSRCSEIT, I. T. (2020). CSPM- Cloud Security Posture Management (Comprehensive Security for Cloud Environment). International Journal of Scientific Research in Computer Science, Engineering and Information Technology. <https://doi.org/10.32628/CSEIT206268>
9. Yadav, Baleshwar & Sharma, Mansi. (2023). Cloud Workload Protection Platform Market.

10. D., Divyabharathi & Cholli, Nagaraj. (2020). A Review on Identity and Access Management Server (KeyCloak). International Journal of Security and Privacy in Pervasive Computing. 12. 46-53. 10.4018/IJSPPC.2020070104.

Received 13.01.2025.
Accepted 16.01.2025.

Analysis of open-source tools for protecting resources in cloud environments

Cloud environments are becoming an integral part of the infrastructure of many companies due to their flexibility, accessibility and efficiency. However, due to their dynamic nature, they create new threats to data security, therefore, they require separate tools to combat them. The article compares existing open source tools for protecting cloud environments: Checkov, Falco, Keycloak. According to the article, the main benefits of open source software are: price, stability and community support.

For each of the tools some flaws are found which make these tools vulnerable to malicious actors:

- Checkov implements CSPM process which does not monitor the runtime environment, so it cannot identify suspicious behavior, such as an unexplained spike in network activity.*

- Falco is hard to integrate into existing systems as it requires agents to be added to each component. Also it does not have any information on the control plane so it does not view on the entirety of the cloud which allows attacks to target underlying infrastructure instead of workloads*

- Keycloak has issues with scalability and can be difficult to configure and customize to integrate with some systems. Some systems might require some custom solutions to make integration possible and these solutions can lead to new vulnerabilities being introduced into the system. Also clients' credentials might get compromised which can allow bad actors to access the system.*

These flaws make these tools not universal, so it creates the need to deploy and support several tools at once to protect the cloud, which leads to the complexity of the systems as a whole and increases their costs. Also, the complexity of the system can create new, non-obvious attack vectors. This demonstrates the need to create more advanced and universal tools that can simplify the process of protecting cloud environments.

Keywords: cloud environments, cybersecurity, software, open source software, distributed systems, Checkov, Falco, CSPM, CWPP.

Бобренко Вячеслав Віталійович - аспірант кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

Гуда Антон Ігорович - доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

Bobrenok Viacheslav - Post graduate student of the Department of Information Technologies and Systems of the Ukrainian State University of Science and Technology

Guda Anton - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Information Technologies and Systems of the Ukrainian State University of Science and Technology.

Т.В. Хом'як, К.В. Сидоренко, А.В. Малієнко, О.С. Мінеєв

ПРОГНОЗУВАННЯ ПРИЧИН ВИЯВЛЕННЯ ЦУКРОВОГО ДІАБЕТУ МЕТОДАМИ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Анотація. Цукровий діабет - одне з найпоширеніших хронічних захворювань у світі, яким страждає близько 530 мільйонів людей. Основна причина появи включає генетичну схильність, ожиріння, неправильну харчову поведінку, інсулінорезистентність та шкідливі звички. Вчасне виявлення захворювання може запобігти його розвитку. Багато симптомів цукрового діабету, таких як сухість у роті, часті сечовипускання, погіршення зору, втрата ваги, постійне відчуття голоду, не завжди відразу розглядаються як ознаки захворювання. Але ці симптоми можуть бути ранніми показниками високого рівня глюкози у крові. В роботі проведено аналіз факторів та причин, які впливають на ризик розвитку цукрового діабету та зроблено прогнозування методом машинного навчання Decision Tree, Random Forest, k-NN та Ada Boost. Поведено аналіз отриманих результатів, оцінено точність використаних методів. Отримані результати нададуть змогу виявляти значно більшу кількість випадків діабету до його появи, раннє та ефективне лікування, зменшення витрат на медичне обслуговування. Ключові слова: цукровий діабет, прогнозування, машинне навчання, Decision Tree, Random Forest, Ada Boost, k-NN.

Постановка проблеми. Одним з головних факторів, які можуть сприяти виникнення цукрового діабету є відсутність своєчасного виявлення захворювання у людини. Зазвичай, люди, які мають такі симптоми, як сухість у роті, часті сечовипускання, погіршення зору, постійну втому, підвищення чи втрату ваги, постійне відчуття голоду, не звертаються до лікаря. Оскільки вони не знають, що дані симптоми можуть вказувати на високий рівень глюкози у крові. Профілактика та раннє виявлення діабету є критично важливими для глобального розвитку здоров'я.

Метою роботи є проведення аналізу факторів та причин, які впливають на появу цукрового діабету, а також прогноз виявлення захворювання до його появи аби запобігти його розвитку в організмі людини, використовуючи показники та звички людини. Оскільки, діабет може призвести до серйозних ускладнень, включаючи пошкодження нирок та серцево-судинних захворювань, що загрожує життю. У разі несвоечасного виявлення захворювання можливі важкі стани, такі як ампутація кінцівок та втрата зору.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день існує велика кількість публікацій, пов'язана з дослідженням хвороби. Так, в роботі [1] наведено кла-

сифікацію діабету, описано причини та наслідки хвороби. Також є роботи в сфері прогнозування виникнення діабету за допомогою методів машинного та глибокого навчання [2-4].

В роботі [4] зазначено, що до 2034 року кількість пацієнтів із захворюванням на цукровий діабет перевищить 592 мільйони. Для передбачення і діагностики діабету запропоновано комп'ютеризовану систему, що заснована на поєднанні алгоритмів Vector Machine, Decision Tree, Naive Bayes і ANN. Але для навчання взята невелика вибірка в розмірі 768 екземплярів.

В дослідженні [5] виявлено проблеми з класифікацією і запропоновано зменшити дані для досягнення вищої та ефективнішої точності. Для прогнозування були використані алгоритм побудови дерева рішень та модифікування Fuzzy SLIQ.

Таким чином, кожен алгоритм має власний набір переваг і недоліків в залежності від початкових даних. Тож використаємо прогнозування методами машинного навчання Decision Tree, Random Forest, k-NN, Ada Boost і порівняємо їх точність для задачі прогнозування виявлення захворювання до його появи

Викладення основного матеріалу дослідження. Початкові дані для аналізу та прогнозування виявлення цукрового діабету взято з сайту «Центр контролю та профілактики захворювань», які подано у форматі csv-файлу із 22 колонок (показники та параметри людей) та 253689 рядків (значення показників та параметрів) для кожної людини [6] (табл. 1).

Таблиця 1

Структура початкових даних

Назва колонки	Тип (значення) колонки	Опис колонки
1	2	3
Diabetes_012	0 – no diabetes 1 – prediabetes 2 – diabetes	0 – пацієнт не має діабету, 1 – пацієнт схильний до діабету (переддіабет), 2 – пацієнт має діабет
HighBP	0 – no high BP 1 – high BP	0 – не має високий тиск, 1 – має високий тиск.
HighChol	0 – no high cholesterol 1 – high cholesterol	0 – не має високий холестерин, 1 – має високий холестерин.
CholCheck	0 – no cholesterol check in 5 years 1 – yes cholesterol check in 5 yearsCholCheck	0 – не було перевірки холестерину через 5 років, 1 – була перевірка холестерину через 5 років.
BMI	Число	Індекс маси тіла
HeartDiseaseorAttack	0 – no	Чи була ішемічна хвороба серця або ін-

	1 – yes	факт: 0 – ні, 1 – так.
Smoker	0 – no 1 – yes	Інформація про пацієнта, чи курих як мінімум 100 цигарок за своє життя: 0 – ні, 1 – так.
Stroke	0 – no 1 – yes	Інформація про пацієнта, чи був колись інсульт: 0 – ні, 1 – так.
PhysActivity	0 – no 1 – yes	Інформація про фізичну активність пацієнта протягом останні 30 днів, окрім роботи: 0 – ні, 1 – так.
Fruits	0 – no 1 – yes	Інформація про споживання фруктів 1 або більше разів у день пацієнта: 0 – ні, 1 – так.
Veggies	0 – no 1 – yes	Інформація про споживання овочів 1 або більше разів у день пацієнта: 0 – ні, 1 – так.
HvyAlcoholConsump	0 – no 1 – yes	Інформація про споживання алкоголю (для чоловіків більше 14 напоїв на тиждень, для жінок – 7): 0 – ні, 1 – так.
AnyHealthcare	0 – no 1 – yes	Інформація про наявність медичного страхування у пацієнта: 0 – ні, 1 – так.
NoDocbcCost	0 – no 1 – yes	Інформація про похід пацієнта до будь-якого лікаря протягом останніх 12 місяців: 0 – ні, 1 – так.
GenHlth	1 – excellent, 2 – very good, 3 – good, 4 – fair, 5 – poor.	Інформація про здоров'я пацієнта на його думку за шкалою: 1 – відмінна, 2 – дуже хороша, 3 – нормальна, 4 – задовільна, 5 – погана.
MenthHlth	Число (1-30)	Інформація про психічне здоров'я, де пацієнт мав стрес, депресію та проблеми з емоціями протягом останніх 30 днів.
PhysHlth	Число (1-30)	Інформація про фізичне здоров'я, де пацієнт мав фізичні захворювання та травми протягом останніх 30 днів (скільки днів пацієнт мав такий стан)
DiffWalk	0 – no 1 – yes	Інформація про пацієнта чи є серйозні труднощі при ходьбі чи підйомі по сходах: 0 – ні, 1 – так.
Sex	0 – female,	Стать пацієнта:

	1 - male	0 – жінка, 1 – чоловік.
Age	Число	Вік, де поділено на 13 категорій: 1 – 18-24, 13 – 80 і більше років.
Education	1 – never attended school 2 – elementary grades 3 – some high school graduate 4 – high school graduate 5 – college year to 3 years 6 – college 4 years or more	Інформація про освіту пацієнта: 1 – ніколи не відвідував школу, 2 – 1-8 класи, 3 – 9-11 класи, 4 – 12 класів, 5 – коледж до 3 років, 6 – закінчив коледж.
Income	Число (1-8)	Інформація про заробітну плату, яка розподілена на 8 груп, де 1 – менше ніж 10000\$, 8 – більше, ніж 75000\$.

Для аналізу та прогнозування методами машинного навчання дані було завантажено в Google Colab для подальшої обробки мовою Python. На рис. 1 наведено початковий дата сет.

	Diabetes_012	HighBP	HighChol	CholCheck	BMI	Smoker	Stroke	HeartDiseaseorAttack	PhysActivity	Fruits	...	AnyHealthcare	NoDocbcCost	GenHlth	MentHlth
0	0.0	1.0	1.0	1.0	40.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	1.0	0.0	5.0	18.0
1	0.0	0.0	0.0	0.0	25.0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	...	0.0	1.0	3.0	0.0
2	0.0	1.0	1.0	1.0	28.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	...	1.0	1.0	5.0	30.0
3	0.0	1.0	0.0	1.0	27.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	...	1.0	0.0	2.0	0.0
4	0.0	1.0	1.0	1.0	24.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	...	1.0	0.0	2.0	3.0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
253675	0.0	1.0	1.0	1.0	45.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	...	1.0	0.0	3.0	0.0
253676	2.0	1.0	1.0	1.0	18.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	1.0	0.0	4.0	0.0
253677	0.0	0.0	0.0	1.0	28.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	...	1.0	0.0	1.0	0.0
253678	0.0	1.0	0.0	1.0	23.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	...	1.0	0.0	3.0	0.0
253679	2.0	1.0	1.0	1.0	25.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	...	1.0	0.0	2.0	0.0

253680 rows x 22 columns

I	Smoker	Stroke	HeartDiseaseorAttack	PhysActivity	Fruits	...	AnyHealthcare	NoDocbcCost	GenHlth	MentHlth	PhysHlth	DiffWalk	Sex	Age	Education	Income
0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	1.0	0.0	5.0	18.0	15.0	1.0	0.0	9.0	4.0	3.0
0	1.0	0.0	0.0	1.0	0.0	...	0.0	1.0	3.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7.0	6.0	1.0
0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	...	1.0	1.0	5.0	30.0	30.0	1.0	0.0	9.0	4.0	8.0
0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	...	1.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	11.0	3.0	6.0
0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	...	1.0	0.0	2.0	3.0	0.0	0.0	0.0	11.0	5.0	4.0
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	...	1.0	0.0	3.0	0.0	5.0	0.0	1.0	5.0	6.0	7.0
0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	...	1.0	0.0	4.0	0.0	0.0	1.0	0.0	11.0	2.0	4.0
0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	...	1.0	0.0	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	5.0	2.0
0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	...	1.0	0.0	3.0	0.0	0.0	0.0	1.0	7.0	5.0	1.0
0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	...	1.0	0.0	2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0	6.0	2.0

Рисунок 1 – Початкові дані в Google Colab
(перші та останні 5 рядків початкових даних)

Набір даних є незбалансованим, значення «0» (не має діабету) зустрічається 213703 рази, «1» (перед діабет) – 35346 раз та «2» (має діабет) – 4631 раз. Цей фактор враховано в процесі попереднього опрацювання даних. Наведемо основні кроки попереднього опрацювання даних:

- збір та завантаження даних;
- видалення даних, які мають дублікати, кількість знайдених дублікатів дорівнює 15548, даних зі значенням NaN або NULL не було знайдено;
- аналіз та візуалізація даних для отримання розподілу та взаємозв'язків між ознаками;
- приведення числових ознак до одного і того ж масштабу або стандартної одиниці вимірювання;
- видалення викидів (outliers) за допомогою методу Isolation Forest, де було знайдено та видалено 114071 аномальних значень, тобто після видалення аномалій дата сет має 114071 рядків значень показників пацієнтів;
- відбір ознак (Feature Selection): для даного набору даних при першому аналізі кожної колонки даних було виявлено, що колонки Education, Income, AnyHealthcare, є неінформативними для виявлення цукрового діабету у людини;
- розділення даних (Data Splitting): для даного набору даних було обрано, що 70% даних – навчальна вибірка та 30% – тестова;
- балансування класів (Class Balancing): для даного набору даних було обрано метод SMOTEENN, після застосування якого дані були збалансовані, де класи мали наступні значення «0» – 27948 значення, «1» – 39597, «2» – 35628 значень.
- масштабування атрибутів методом Standard Scaler.

Після опрацювання початкових даних було побудовано діаграму співвідношення трьох можливих стадій діабету (рис. 3). Виявлено, що 82,7% - не мають діабет, 15,3 % - мають діабет та 2% - перед діабет.

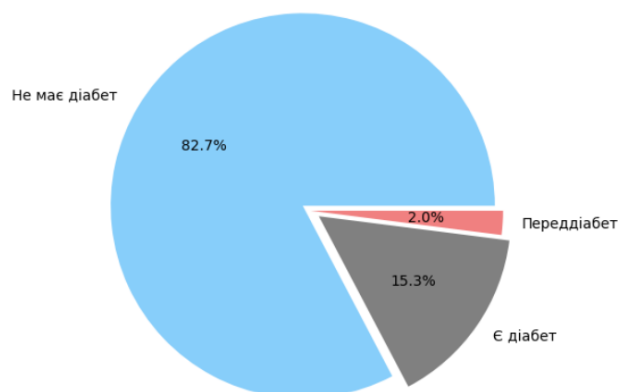


Рисунок 3 – Діаграма співвідношення можливих стадій діабету

Для аналізу ступеня впливу на виявлення діабету побудовано матрицю кореляції (рис. 4). Кореляцію близько 0,2 мають показники холестерин, індекс маси тіла, ішемічна хвороба серця, фізичне здоров'я, труднощі з ходьбою та вік, тобто важливі фактори на вплив появи та розвитку діабету в організмі людини. Менший вплив мають наступні

фактори, як куріння, інсуліт, наявність медстрахування, відвідування лікаря, стать та психічне здоров'я (кореляція у проміжку від 0 до 0,1). Від'ємний коефіцієнт кореляції спостерігається у наступних факторів: фізична активність, вживання фруктів та овочів, алкогольна залежність, освіта та дохід.

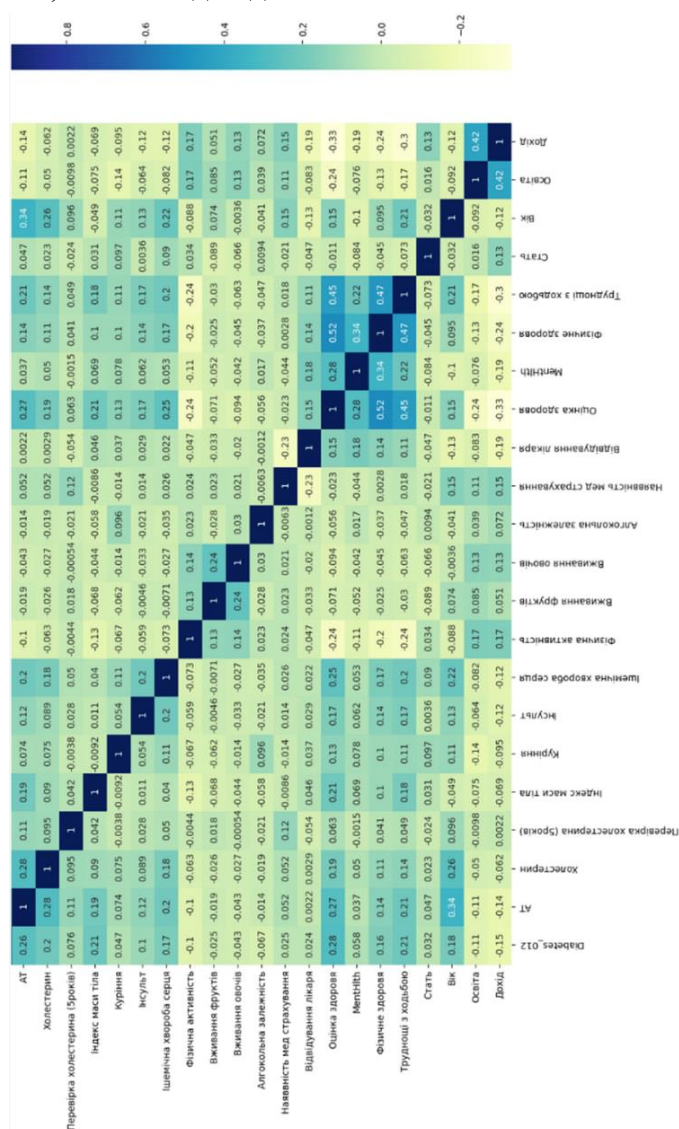


Рисунок 4 – Матриця кореляції факторів, що впливають на виявлення діабету

На основі отриманої діаграми розподілу ознаки статі в залежності від стадій діабету (рис. 4) можна зробити висновки:

- мають діабет майже однакова кількість жінок та чоловіків близько 8%;
- стан перед діабету мають близько 1%, але жінки трохи більше;
- жінок, які не мають діабета на 20000 більше, ніж чоловіків.

Таким чином, стан діабету або перед діабету мають трохи більше жінки ніж чоловіки, оскільки жінки можуть мати гормональні зміни під час життя, які можуть впливати на ризик діабету.

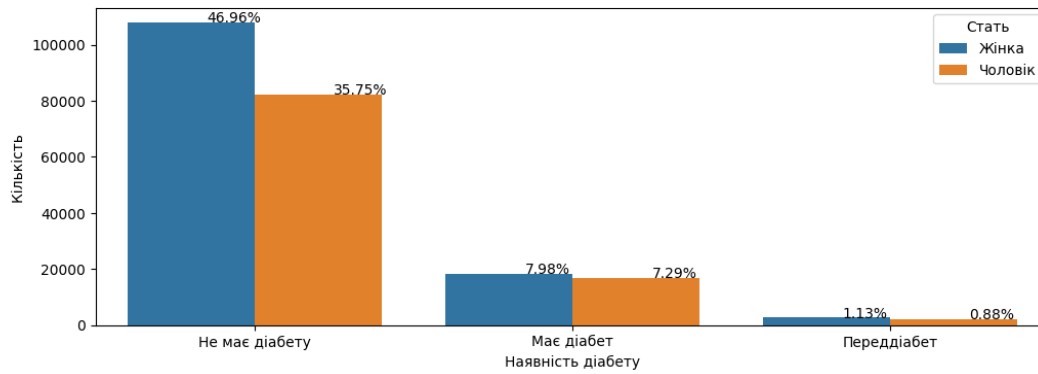


Рисунок 5 – Діаграма розподілу стадій діабету за статтю

Після проведення аналізу кожного показнику можна зробили наступні висновки:

- пацієнти, які мають ішемічну хворобу серця (ІХС), хворіють приблизно у 4 рази більше на цукровий діабет;
- із 27% пацієнтів, які палять, 8% мають цукровий діабет або перед діабет;
- жінок, які не мають діабету, на 20000 більше, ніж чоловіків;
- пацієнти, які не вживають фрукти, майже у 2 рази більше, які не хворіють на цукровий діабет;
- пацієнти з високим холестеринем хворіють у два рази частіше на цукровий діабет;
- пацієнти у віці від 50 до 64 років складають найбільшу кількість тих, хто має діабет;
- кількість пацієнтів з ожирінням та цукровим діабетом складає 50%;
- частина пацієнтів, які мають інсульт та діабет, складає 1,5%;
- фізично активні пацієнти мають діабет у 3,5 рази менше, ніж інші.

Для прогнозування методом Decision Tree [6] обрано такі гіперпараметри: criterion= 'entropy', max_depth=40, а інші параметри за замовченням. Результати наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Результати моделі Decision Tree Classifier

class	precision	recall	f1-score	accuracy
0 (не має діабет)	0.92	0.89	0.91	0.92
1 (перед діабет)	0.93	0.95	0.94	
2 (має діабет)	0.89	0.89	0.89	

З таблиці 2 можна зробити висновки, що точність моделі для всіх класів дорівнює 0.92, що свідчить про її загальну ефективність у класифікації. Модель має високі показники precision та recall для класів "Не має діабету" і "Пред діабет", що робить її корисною для виявлення цих станів у пацієнтів. Однак для класу "Має діабет" її ефективність менша.

Результати тестування моделі Random Forest Classifier з наступними гіперпараметрами: $n_estimators=100$, $max_features=16$, $max_depth=16$ (інші параметри за замовченням) наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати моделі Random Forest Classifier

class	precision	recall	f1-score	accuracy
0 (не має діабет)	0.93	0.89	0.91	0.95
1 (перед діабет)	0.86	0.86	0.86	
2 (має діабет)	0.79	0.82	0.81	

Загальна точність цієї моделі для всіх класів становить 0.95, що свідчить про її загальну ефективність у класифікації. Модель має найкращі показники для класу "Не має діабету", що робить її корисною для виявлення цього стану, проте для класів "Пред діабет" і "Має діабет" точність менша.

Результати тестування моделі Ada Boost Classifier з гіперпараметрами $n_estimators=100$, $max_features=16$, $max_depth=16$ (інші параметри за замовченням) наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Результати моделі Ada Boost Classifier

class	precision	recall	f1-score	accuracy
0 (не має діабет)	0.84	0.77	0.80	0.63
1 (перед діабет)	0.59	0.55	0.57	
2 (має діабет)	0.54	0.62	0.58	

Загальна точність даної моделі для всіх класів становить 0.63, що свідчить про її загальну ефективність у класифікації. Проте точність та повнота для класів "Пред діабет" і "Має діабет" є недостатньо високими, вказуючи на помилкові класифікації для цих груп.

Результати тестування моделі K-NN Classifier з гіперпараметром - кількість сусідів = 5 (інші за замовченням) наведені в таблиці 5.

Таблиця 5

Результати моделі K-NN Classifier

class	precision	recall	f1-score	accuracy
0 (не має діабет)	0.91	0.98	0.94	0.9
1 (перед діабет)	0.00	0.00	0.00	
2 (має діабет)	0.31	0.10	0.15	

З таблиці 5 можна зробити висновок, що модель здійснила не збалансовану класифікацію даних, оскільки показники precision, recall, f1-score доволі різні для трьох класів, а це вказує на те, що модель не навчилася розрізняти ці три класи. Тому потрібно було зробити балансування даних за допомогою методу SMOTEENN, після цього

дані стали збалансовані, де кожен клас мав таку кількість значень: «0» – 27948 значень, «1» – 39597, «2» – 35628. Після цього ще раз проведено тренування та тестування моделі, результати наведено у таблиці 6.

Таблиця 6

Результати моделі K-NN Classifier

class	precision	recall	f1-score	accuracy
0 (не має діабет)	0.99	0.87	0.93	0.96
1 (перед діабет)	0.96	1.00	0.98	
2 (має діабет)	0.94	0.98	0.96	

Узагальнюючи отримані результати, можна сказати, що модель може бути корисною для точної класифікації пацієнтів з діабетом і перед діабетом, але може не виявити всіх пацієнтів без діабету. Точність моделі в цілому є високою.

Висновки. Після проведення прогнозування виявлення цукрового діабету в організмі людини, використовуючи показники та звички людей чотирма методами машинного навчання, можна зробити висновок, що найбільшу точність 95% має метод Random Forest, а найменшу 63% – Ada Boost, проте не треба одразу поспішати та обирати найкращою моделлю Random Forest Classifier. Оскільки, якщо порівняти показники precision, recall та f1-score, можна побачити, що модель Decision Tree Classifier має найвищі показники f1-score для всіх трьох класів (0.94, 0.93, 0.89). Це вказує на кращу здатність моделі розрізняти всі три класи (не має діабету, перед діабет, має діабет) порівняно з іншими результатами моделей. Тому найкращим методом для розв’язання поставленої задачі є Decision Tree.

Отримані результати дослідження мають велике значення, оскільки вони можуть бути використані для покращення роботи медичних фахівців у виявленні цукрового діабету до його появи аби запобігти його розвитку в організмі людини та підвищити шанси порятунку життя та здоров'я пацієнтів, які стикаються з цією серйозною та невиліковною хворобою. Результати роботи також можуть бути корисними для розробки та моделювання інформаційних систем з прогнозу виявлення цукрового діабету.

ЛІТЕРАТУРА

1. American Diabetes Association. Diagnosis and classification of diabetes mellitus // Diabetes Care. *Clinical Practice Recommendations*. 2012. Vol. 35 (Supplement_1). P. 64-71. URL: <https://doi.org/10.2337/dc12-s064>.
2. Larabi-Marie-Sainte S., Aburahmah L., Almohaini R., Saba T. Current techniques for diabetes prediction: review and case study // Appl. Sci. 2019. Vol. 9, no. 4604. URL: <https://doi.org/10.3390/app9214604>.
3. Zia U.A., Khan N. Predicting diabetes in medical datasets using machine learning techniques // Int. J. Sci. Eng. Res. 2017. Vol. 8(5). P. 257–267.
4. Neha D., Chande P., Neha M. A Study of Machine Learning Techniques for Diabetes Prediction // *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2022. Vol. 10, no. 2. P. 133-140. URL: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/181022022>.

5. Kamadi, V., Allam A., Thummala, S. A computational intelligence technique for the effective diagnosis of diabetic patients using principal component analysis (PCA) and modified fuzzy SLIQ decision tree approach // *Applied Soft Computing*, 2016. Vol.49, P.137-145. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.05.010>.
6. Сидоренко Є.В., Хом'як Т.В. Аналіз причин та прогнозування виявлення цукрового діабету методом машинного навчання Decision Tree // The 6th International scientific and practical conference "Methodical and practical methods of creating inventions" (October 24 – 27, 2023), Sofia, Bulgaria. International Science Group. 2023. с. 266-271. (URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.2.6>).

REFERENCES

1. American Diabetes Association. Diagnosis and classification of diabetes mellitus // Diabetes Care. *Clinical Practice Recommendations*. 2012. Vol. 35 (Supplement_1). P. 64-71. URL: <https://doi.org/10.2337/dc12-s064>.
2. Larabi-Marie-Sainte S., Aburahmah L., Almohaini R., Saba T. Current techniques for diabetes prediction: review and case study // *Appl. Sci.* 2019. Vol. 9, no. 4604. URL: <https://doi.org/10.3390/app9214604>.
3. Zia U.A., Khan N. Predicting diabetes in medical datasets using machine learning techniques // *Int. J. Sci. Eng. Res.* 2017. Vol. 8(5). P. 257–267.
4. Neha D., Chande P., Neha M. A Study of Machine Learning Techniques for Diabetes Prediction // *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*. 2022. Vol. 10, no. 2. P. 133-140. URL: <https://doi.org/10.30534/ijeter/2022/181022022>.
5. Kamadi, V., Allam A., Thummala, S. A computational intelligence technique for the effective diagnosis of diabetic patients using principal component analysis (PCA) and modified fuzzy SLIQ decision tree approach // *Applied Soft Computing*, 2016. Vol.49, P.137-145. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.05.010>.
- Sydorenko K.V., Khomiak T.V. Analiz prichyn ta prognozyvannya vyivlennya tsukrovogo diabetu metodom mashinnogo navchannya Decision Tree // The 6th International scientific and practical conference "Methodical and practical methods of creating inventions" (October 24 – 27, 2023), Sofia, Bulgaria. International Science Group. 2023. p. 266-271. (URL: <https://doi.org/10.46299/ISG.2023.2.6>).

Received 14.01.2025.

Accepted 17.01.2025.

Prediction causes of diabetes detection using machine learning methods

Diabetes is one of the most common chronic diseases in the world, affecting about 530 million people. The main causes of its occurrence include genetic predisposition, obesity, improper eating behavior, insulin resistance and bad habits. Early detection of the disease can prevent its development. Many symptoms of diabetes, such as dry mouth, frequent urination, blurred vision, weight loss, constant hunger, are not always immediately considered as signs of the disease. But these symptoms can be early indicators of high blood glucose levels. The paper analyzes the factors and causes that affect the risk of developing diabetes and makes predictions using the Decision Tree, Random Forest, k-NN and Ada Boost machine learning methods. The results are analyzed and the accuracy of the methods used is assessed. The re-

sults obtained will allow for the detection of significantly more cases of diabetes before it occurs, early and effective treatment, and reduction of healthcare costs.

Keywords: diabetes, prediction, machine learning, Decision Tree, Random Forest, Ada Boost, k-NN.

Хом'як Тетяна Валеріївна – доцент кафедри системного аналізу та управління, к.ф.-м.н., Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Сидоренко Катерина Віталіївна – студентка кафедри системного аналізу та управління, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Малієнко Андрій Вікторович – доцент кафедри системного аналізу та управління, к.т.н., Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Мінєєв Олександр Сергійович – доцент кафедри системного аналізу та управління, к.т.н., Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

Khomiak Tetiana – Associate Professor of the Department of System Analysis and Control, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, National Technical University "Dnipro University of Technology".

Sydorenko Kateryna – student of the Department of System Analysis and Control, National Technical University "Dnipro University of Technology".

Maliienko Andrii – Associate Professor of the Department of System Analysis and Control, Candidate of Technical Sciences, National Technical University "Dnipro University of Technology".

Mineyev Oleksandr – Associate Professor of the Department of System Analysis and Control, Candidate of Technical Sciences, National Technical University "Dnipro University of Technology".

К.Ю. Островська, Е.Х. Петросян

НЕЙРОМЕРЕЖЕВА МОДЕЛЬ ДЕТЕКТУВАННЯ ТА ВІДСТЕЖЕННЯ У ТРАНСПОРТНОМУ ПОТОЦІ МІСТА

Анотація. В роботі проведено опис предметної галузі, а саме опис методів машинного навчання та нейронної мережі, а також завдання класифікації. Крім вищепереліченого було проведено огляд наукової літератури та аналогів та опис сімейства нейромережових моделей YOLOv7.

Описано архітектуру нейромережової моделі YOLOV7, її основні частини та їх призначення. Було описано набір даних для навчання та тестування моделі, описано веб-додаток «RoboFlow», в якому виконувалася розмітка зображень. Також було описано алгоритм Deep SORT для відстеження об'єктів у часі.

Реалізовано нейромережну модель для детектування та трекінгу електросамокатів у транспортному потоці. Модель була навчена на зібраному наборі даних. Також було реалізовано веб-додаток для демонстрації роботи нейромережової моделі. Веб-додаток повністю відповідає функціональним та нефункціональним вимогам.

Проведено тестування нейронної мережі, тестування проводилося на різних моделях YOLOV7, найкращий результат показала модель YOLOV7-w6. Також було проведено функціональне тестування веб-програми. Було проведено автоматизоване тестування веб-застосування за допомогою інструменту suppress, веб-додаток було протестовано за допомогою двох видів тестування, компонентного та E2E.

Ключові слова: машинне навчання, YOLOV, тестування, трекінг, електросамокат, deep sort, детекція, веб-додаток.

Вступ. Управління дорожнім рухом вимагає інформації про його стан, виражений параметрами, вимірними за допомогою датчиків. Сукупність значень параметрів як системи детектування транспортних потоків необхідна гнучкого регулювання, розрахунку чи автоматичного вибору програми управління дорожнім рухом.

У сучасному світі використання електросамокатів стало дуже популярним, проте це викликає занепокоєння щодо безпеки інших учасників дорожнього руху. Детектування та відстеження водіїв електросамокатів у транспортному потоці є важливим завданням. Це дозволить у майбутньому збільшити безпеку на дорогах та тротуарах.

Метою роботи є розробка нейромережової моделі детектування та відстеження електросамокатів у транспортному потоці міста.

Для реалізації веб-додатку для детектування та трекінгу водіїв електросамокатів на зображенні або відео були використані мови програмування Python, який використо-

увався для реалізації нейронної мережі та серверної частини, та TypeScript, який використовувався для реалізації клієнтської частини. Для написання коду використовувалися IDE PyCharm Community Edition та Visual Studio Code.

Основна частина. Особливість сімейства моделей YOLO полягає в тому, що вона застосовує згорткові нейронні мережі на зображення лише один раз на відміну від аналогів.

YOLOv7 перевершує всі відомі детектори об'єктів як за швидкістю, так і за точністю в діапазоні від 5 до 160 кадрів в секунду і має найвищу точність 56,8% AP серед усіх відомих детекторів об'єктів реального часу з частотою 30 кадрів в секунду.

Нейромережева модель YOLOv7 реалізована за допомогою PyTorch.

Архітектура нейромережевої моделі YOLOv7 складається з 3 основних компонентів backbone, neck та head.

Архітектура YOLOv7 представлена на рисунку 1

Backbone. Ця частина архітектури відповідає за початкову підготовку даних для подальшої роботи нейронної мережі. Вхідні зображення проходять через згорткові шари, які відповідають за вилучення ознак із зображень, також зображення проходять через шари пулінгу, які призначені для вирішення проблеми фіксованого розміру карти ознаки. Це дозволяє усунути втрати низькорівневих ознак ранньому етапі.

Neck. Ця частина архітектури відповідає за об'єднання карт ознак, отриманих із попереднього шару.

Head. Ця частина архітектури представлена у вигляді повнозв'язкової нейронної мережі, що складається з трьох шарів.

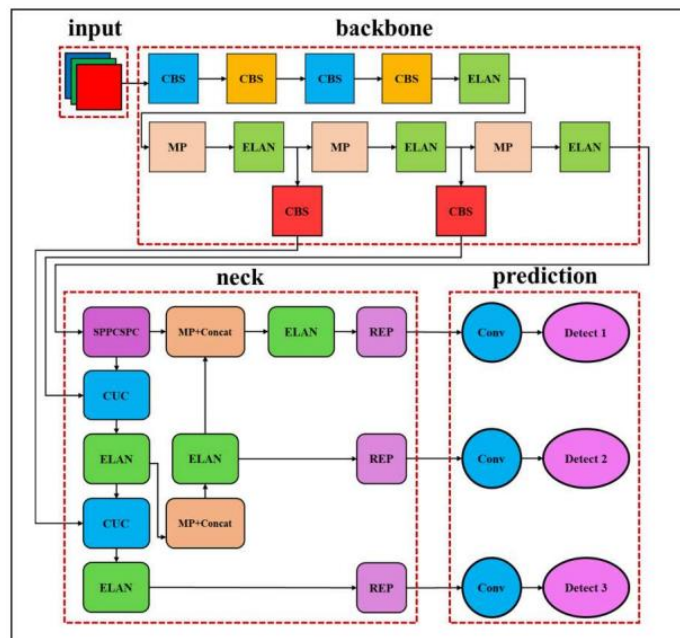


Рисунок 1 – Архітектура нейромережевої моделі YOLOv7

Набір даних. Для навчання та тестування моделі нейронної мережі використовувався набір даних IUPUI-CSRC E-Scooter Rider який містить 10 749 зображень водіїв електросамокатів та 10 705 зображень не водіїв електросамокатів та набір даних

Occluded E-Scooter Rider Detection Dataset загорджених водіїв електросамокатів Приклади зображень із наборів даних представлені на рисунках 2–3.



Рисунок 2 – Приклад зображення з набору даних



Рисунок 3 – Другий приклад зображення з набору даних

Алгоритм відстеження. Після процесу детектування об'єктів за допомогою нейромережевої моделі YOLOV7 необхідно відстежувати об'єкт. Для вирішення задачі відстеження використано алгоритм глибокого сортування (Deep SORT algorithm). Цей алгоритм – це модифікація алгоритму SORT (Simple Online and Realtime Tracking). Алгоритм Deep SORT починає свою роботу з детектування об'єкта за допомогою нейронних мереж для детектування таких як сімейство моделей YOLO або інших. Алгоритм Deep SORT, як і алгоритм SORT містить фільтр Калмана, який необхідний для прогнозування об'єкта на основі таких параметрів як швидкість, позиція і прискорення, завдяки чому фільтр Калмана передбачає становище об'єкта у поточному кадрі.

Діаграма варіантів використання представлена на рисунку 4.

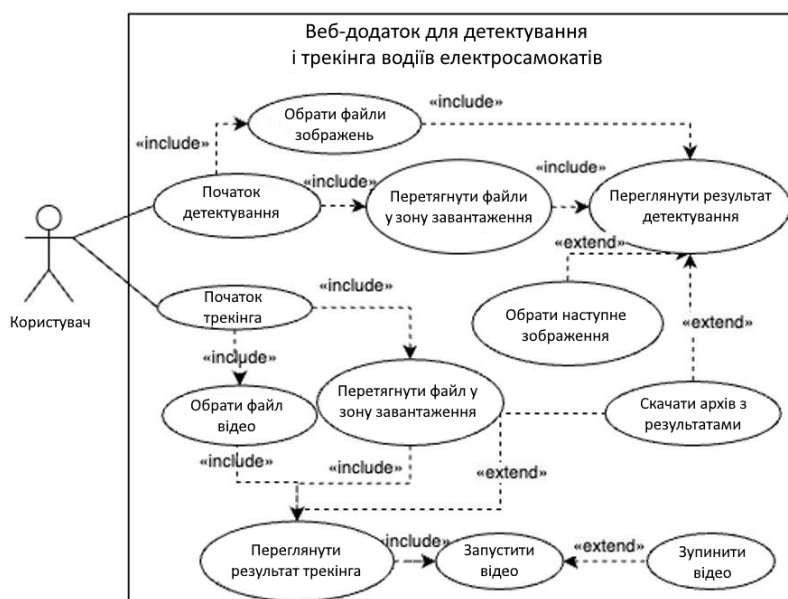


Рисунок 4 – Діаграма варіантів використання

Реалізація та навчання нейромережевої моделі YOLOv7. Для навчання нейромережевої моделі було зібрано набір даних з 3600 зображень і поділених на навчальну (2520 зображень), валідаційну (720 зображень) і тестову (360 зображень) вибірку у співвідношенні 70/20/10.

Навчання нейронної мережі проводилося на хмарній платформі Google Colaborator та GPU Nvidia Tesla T4. Навчання проводилося на 50 епохах, навчання зайняло 3 години.

У ході навчання зберігалися графіки метрик та функції втрат для навчальної та тестової вибірки набору даних. Графіки метрики навчання представлено на рисунку 5.

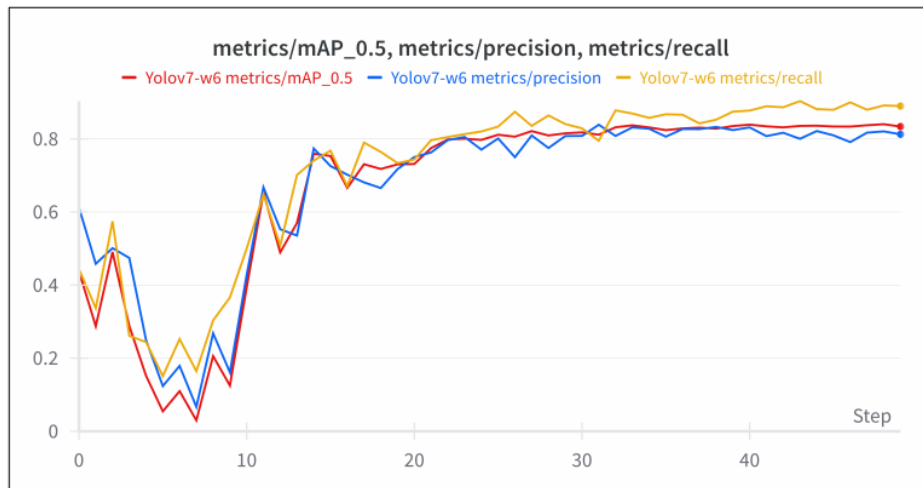


Рисунок 5 - Графік метрик навчання

В результаті навчання різних моделей найкращий результат показала модель yolov7-w6, а саме метрика mAP 84,03%, метрика recall 88,89% і метрика precision 81,26%.

В результаті навчання різних моделей найкращий результат показала модель yolov7-w6, а саме метрика mAP 84,03%, метрика recall 88,89% і метрика precision 81,26% (рисунок 6).

Кількість епох	Модель		
	YOLOv7	YOLOv7x	YOLOv7-w6
Метрика mAP			
15	54,52%	66,06%	75,32%
30	73,6%	76,02%	81,79%
50	79,72%	81,17%	84,03%
Метрика recall			
15	62,95%	65,92%	76,78%
30	72,15%	78,13%	82,88%
50	81,17%	82,88%	88,89%
Метрика precision			
15	55,69%	67,77%	72,57%
30	71,74%	74,76%	80,81%
50	78,64%	79,01%	81,25%

Рисунок 6 – Експерименти з навчанням

Серверна частина веб-програми була написана мовою Python і фреймворком FastApi.

У серверній частині програми є методи API для взаємодії з клієнтською частиною:

- (POST) /images/detect
- (GET) /images/download-zip
- (POST) /video/track
- (GET) /video/download-zip

Клієнтська частина веб-програми була написана мовою Typescript та фреймворком Nest.js. Користувачеві є дві сторінки, одна сторінка для детектування, а інша для трекінгу. Зовнішній вигляд сторінки детектування представлено на рисунку 7.

Якщо користувач завантажив усі файли правильного формату, то після успішної обробки він побачить інтерфейс для перегляду оброблених зображень з результатами детектування, який представлений на рисунку 8.



Рисунок 7 – Сторінка детектування, інтерфейс завантаження

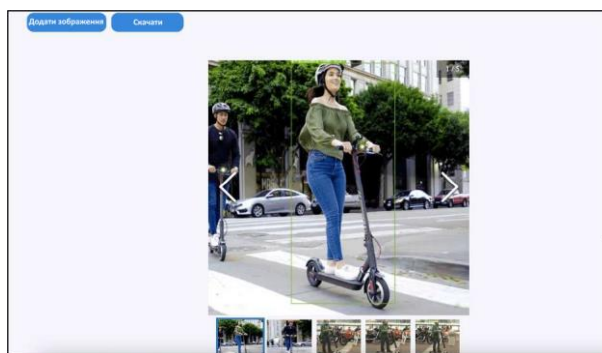


Рисунок 8 – Інтерфейс перегляду оброблених зображень

В інтерфейсі перегляду обробленого відео користувач може переглянути результат трекінгу на відео. Також у користувача з'являється меню дій, за допомогою якого він може завантажити zip архів з результатом або завантажити нове відео для обробки.

Висновки. Згідно з метою даної роботи була розроблена нейромережева модель для розпізнавання та відстеження електросамокатів у транспортному потоці.

Для покращення роботи нейромережевої моделі можна зробити такі дії: збільшити набір даних, додати більше різноманітності даних, донавчити нейромережну модель, змінити топологи моделі, спробувати підібрати параметри, з якими модель видасть кращі результати.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вьюгін В.В. Математичні основи теорії машинного навчання та прогнозування. // К.: 2013. - 387 с.
2. Барський А.Б. Нейронні мережі: розпізнавання, керування, прийняття рішень. // К.: Фінанси та статистика, 2004. - 176 с.
3. Воронін В.В. Теорія та практика машинного навчання: навчальне посібник. / В.В. Вороніна, А.В. Міхєєв, Н.Г. Ярушкіна, К.В. Святков // До, 2017. - 290 с.

4. Gawande U., Hajari K., Golhar Y. Real-time deep learning approach для pedestrian detection i suspicious activity recognition. // Procedia Computer Science, 2023. - T. 218 - C. 2438-2447.
5. Tang F., Yang F., Tian X. Long-distance person detection based on Yolov7. // Electronics, 2023. - T. 12, № 6. - C. 1502-1516.
6. Wang C.-Y., Bochkovskiy A., Liao H.-Y. M. YOLOV7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors.// 2022 -15 с.

REFERENCES

1. Viuhin V.V. Matematychni osnovy teorii mashynnoho navchannia ta prohnozuvannia. // K.: 2013. - 387 s.
2. Barskyi A.B. Neironni merezhi: rozpiznavannia, keruvannia, pryiniattia rishen. // K.: Finansy ta statystyka, 2004. - 176 s.
3. Voronin V.V. Teoriia ta praktyka mashynnoho navchannia: navchalne posibnyk. / V.V. Voronina, A.V. Mikhieiev, N.H. Yarushkina, K.V. Sviatov // Do, 2017. - 290 s.
4. Gawande U., Hajari K., Golhar Y. Real-time deep learning approach для pedestrian detection i suspicious activity recognition. // Procedia Computer Science, 2023. - T. 218 - C. 2438-2447.
5. Tang F., Yang F., Tian X. Long-distance person detection based on Yolov7. // Electronics, 2023. - T. 12, № 6. - C. 1502-1516.
6. Wang C.-Y., Bochkovskiy A., Liao H.-Y. M. YOLOV7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors.// 2022 -15 с.

Received 14.01.2025.

Accepted 17.01.2025.

Neural network model of detection and tracking in the city traffic

The paper describes the subject area, namely the description of machine learning methods and neural networks, as well as the classification task. In addition to the above, a review of scientific literature and analogues and a description of the YOLOv7 family of neural network models were conducted.

The architecture of the YOLOV7 neural network model, its main parts and their purpose were described. The dataset for training and testing the model was described, the web application "RoboFlow" was described, in which image marking was performed. The Deep SORT algorithm for tracking objects in time was also described.

A neural network model for detecting and tracking electric scooters in the traffic flow was implemented. The model was trained on the collected dataset. A web application was also implemented to demonstrate the operation of the neural network model. The web application fully meets the functional and non-functional requirements.

Neural network testing was carried out, testing was carried out on different YOLOV7 models, the best result was shown by the YOLOV7-w6 model. Functional testing of the web program was also carried out. Automated testing of the web application was carried out using the cypress tool, the web application was tested using two types of testing, component and E2E.

According to the purpose of this work, a neural network model was developed for recognizing and tracking electric scooters in traffic.

To improve the performance of the neural network model, the following actions can be taken: increase the data set, add more data diversity, train the neural network model, change the model topologies, try to choose parameters with which the model will give the best results.

Keywords: machine learning, YOLOV, testing, tracking, electric scooter, deep sort, detection, web application.

Островська Катерина Юріївна – доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ «ДМетІ» УДУНТ.

Петросян Едгар Хачатурович - магістр кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ «ДМетІ» УДУНТ.

Ostrovska Kateryna – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Information Technologies and Systems of the Scientific Research Institute "DMetI" UDUNT.

Petrosyan Edgar - Master of the Department of Information Technologies and Systems of the Scientific Research Institute "DMetI" UDUNT.

**АНАЛІЗ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ
МОДЕЛЮВАННЯ Й АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ СИСТЕМАМИ
ЗВОРОТНОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ГІРНИЧО-ЗБАГАЧУВАЛЬНИХ
ПІДПРИЄМСТВ**

Анотація. У статті здійснено системний аналіз програмних засобів, що застосовуються для моделювання та автоматизованого управління у системах зворотного водопостачання гірничо-збагачувальних підприємств. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення ефективності управління водними ресурсами шляхом оптимізації процесів очищення та повторного використання води. Постановка проблеми полягає у визначенні найбільш придатних програмних інструментів для моделювання складних гідродинамічних та технологічних процесів. Метою дослідження є обґрунтування вибору програмних засобів на основі аналізу їхніх функціональних можливостей та відповідності специфіці об'єкта управління. У роботі використано методи системного аналізу, порівняльного оцінювання та експертного аналізу програмних рішень. У результаті визначено переваги й недоліки розглянутих програмних платформ, що дозволяє сформулювати рекомендації щодо їхнього використання у практиці проектування та експлуатації систем зворотного водопостачання.

Ключові слова: системи зворотного водопостачання, гірничо-збагачувальні підприємства, моделювання, гідродинамічні процеси, чисельні методи, моделювання турбулентності, програмні засоби, процеси фільтрації

Постановка проблеми. Системи зворотного водопостачання на підприємствах гірничо-збагачувального комплексу (ГЗК) відіграють ключову роль у забезпеченні безперервності виробничих процесів і збереженні ресурсів. Вони дозволяють значно знизити споживання води за рахунок її повторного використання, що є критично важливим для збереження екологічного балансу і зниження витрат на водопостачання. Проте ці системи є складними, і їх ефективність значною мірою залежить від правильного моделювання потоку рідини та всіх взаємодій між основними компонентами системи — насосами, трубопроводами, фільтрами та іншими елементами.

Одна з основних проблем у моделюванні таких систем полягає в складності прогнозування динаміки потоку в умовах змінних параметрів роботи — від різних витрат води до коливань тиску і температури. Крім того, традиційні методи моделювання часто не враховують складні фізичні процеси, які відбуваються в системах зворотного водопостачання, такі як кавітація, турбулентність або взаємодія з хімічними речовинами.

Існуючі підходи до моделювання потоку рідини в таких системах часто обмежуються використанням спрощених рівнянь, які можуть не відображати всі складнощі роботи таких систем, що, в свою чергу, призводить до неточностей у розрахунках і, як наслідок, до втрат в енергоефективності і водозбереженні.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Серед існуючих методів моделювання потоку рідини у системах зворотного водопостачання можна виділити наступні [1]:

1) Аналітичні методи. Аналітичні методи моделювання потоку рідини в зворотних водопостачальних системах використовуються для розв'язування задачі руху рідини в трубопроводах та інших елементах системи. У багатьох випадках ці методи базуються на рівняннях Бернуллі та рівняннях для ідеальних рідин, таких як рівняння для незріджуваних рідин або рівняння Нав'є-Стокса для стаціонарного потоку. Ці рівняння застосовуються для розрахунку витрат, швидкостей потоку та тиску, однак вони мають обмеження в контексті реальних умов. Наприклад, багато аналітичних моделей не можуть врахувати складні явища, такі як турбулентність, кавітація чи нелінійні зміни в характеристиках потоку, що є важливими в реальних умовах гірничо-збагачувальних підприємств. Аналітичні моделі зручні для первісної оцінки ефективності системи, однак вони значно обмежують можливість точного прогнозування у випадках, коли потрібно враховувати складні динамічні та термодинамічні процеси. Тому для складних технологічних процесів їх застосування часто є неефективним.

2) Чисельні методи. Зі збільшенням обчислювальних потужностей значно зросла роль чисельних методів, зокрема методу кінцевих елементів (МКЕ) та методів об'ємів для аналізу та моделювання потоків рідин у складних системах [2]. Відомим прикладом є методи Computational Fluid Dynamics (CFD), які активно використовуються для моделювання і аналізу потоку рідини в трубопроводах, насосах, фільтрувальних установках та інших елементах зворотних водопостачальних систем. Застосування CFD дозволяє враховувати такі явища, як турбулентність, кавітація, змішування, а також включати ефекти температури і хімічних реакцій. Чисельні методи, зокрема CFD, дають більш точні результати, однак вони потребують великих обчислювальних ресурсів, а також великої кількості вхідних даних для точного налаштування моделей. Крім того, ці методи можуть бути дуже чутливими до початкових умов, що робить їх застосування в реальних умовах більш складним.

3) Гібридні методи. Гібридні методи є спробою поєднання переваг аналітичних та чисельних підходів [3]. Ці методи використовують простіші аналітичні моделі для попередньої оцінки основних параметрів системи і чисельні методи для детального аналізу окремих частин системи, таких як насосні станції або фільтри. Наприклад, спочатку може бути застосована модель для прогнозування загальних витрат води і налаштування характеристик насосів, а потім для детального аналізу використовуються CFD моделі для визначення оптимальних параметрів. Хоча такий підхід знижує обчислювальні витрати та може забезпечити більш швидкі результати, він потребує значної інтеграції різних підходів, а також досвіду в розробці комбінованих моделей для конкретних умов.

Існуючі методи моделювання потоку рідини в системах зворотного водопостачання мають різні переваги та недоліки. Традиційні аналітичні моделі не здатні врахувати всі аспекти реальних процесів, в той час як чисельні методи, зокрема CFD, дозволяють моделювати складні гідродинамічні явища, але потребують великих обчислювальних ресурсів. Гібридні методи дозволяють оптимізувати ці підходи, однак вони потребують глибоких досліджень для точного налаштування і інтеграції різних моделей в реальних умовах підприємств.

Мета дослідження. Метою цього дослідження є розробка та вдосконалення методів моделювання потоку рідини у системах зворотного водопостачання на підприємствах гірничо-збагачувального комплексу (ГЗК), з урахуванням специфічних умов експлуатації, таких як високий рівень забруднень, зміни температури та турбулентність потоку. У рамках цього дослідження передбачається також аналіз та вибір програмних систем для чисельного моделювання потоку рідини в системах зворотного водопостачання.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для моделювання потоку рідини в системах зворотного водопостачання підприємств ГЗК використовуються чисельні методи, зокрема, методи розв'язку рівнянь гідродинаміки, що описують поведінку потоку в трубопроводах. Розглянемо детальніше основні математичні моделі та методи.

1) Рівняння Нав'є-Стокса. Основним рівнянням, що описує рух нестационарного потоку рідини є рівняння Нав'є-Стокса для рідини в умовах турбулентного потоку [4]:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \mathbf{f}, \quad (1)$$

де ρ - густина рідини, $\mathbf{u}$ - вектор швидкості потоку, t - час, p - тиск, μ - динамічна в'язкість рідини, $\mathbf{f}$ - сили, що діють на рідину (наприклад, гравітація або сила стискування).

Це рівняння описує закон руху рідини в середовищі з врахуванням всіх сил, які впливають на потік. Для опису турбулентних потоків, як правило, використовують модель турбулентності, таку як модель $k-\epsilon$

2) Модель турбулентності $k-\epsilon$ [5]. Для більш точної моделі турбулентних течій використовується модель $k-\epsilon$, яка описує енергетику турбулентних струмів. Вона складається з двох додаткових рівнянь для величин: k - кінетична енергія турбулентності, ϵ - коефіцієнт дисипації турбулентності.

Рівняння для k та ϵ виглядають наступним чином:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla k = \nabla \cdot (\mu_T \nabla k) + P_k - \epsilon; \quad (2)$$

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \epsilon = \nabla \cdot (\mu_T \nabla \epsilon) + C_{\epsilon 1} \frac{\epsilon}{k} P_k - C_{\epsilon 2} \epsilon^2, \quad (3)$$

де μ_T - турбулентна в'язкість, P_k - потужність, що передається в турбулентність від основного потоку, $C_{\epsilon 1}$, $C_{\epsilon 2}$ - постійні, які залежать від обраної моделі турбулентності.

Модель $k-\epsilon$ є однією з найбільш широко застосовуваних завдяки своїй здатності точно описувати турбулентні потоки в різних умовах.

3) Моделювання процесу фільтрації та переміщення забруднювачів [6]. Для опису процесу переміщення забруднювачів у системах зворотного водопостачання використовуються рівняння переносу, які описують концентрацію забруднювачів у потоці рідини. Загальна форма рівняння переносу виглядає наступним чином:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla C = D \nabla^2 C + R(C), \quad (4)$$

де C - концентрація забруднювача, D - коефіцієнт дифузії, $R(C)$ — терміни, що описують хімічні реакції або взаємодії забруднювачів.

Це рівняння дозволяє моделювати, як забруднювачі переміщуються з потоком рідини та як змінюється їхня концентрація під впливом різних процесів очищення.

4) Чисельне вирішення рівнянь. Для чисельного розв'язку отриманих рівнянь використовуються методи, зокрема метод кінцевих об'ємів (Finite Volume Method, FVM) [7]. Цей метод дозволяє ефективно працювати з нерівномірними сітками та забезпечує точність при великих швидкостях потоку та складних геометріях.

Один з варіантів чисельного розв'язку рівняння Нав'є-Стокса та рівнянь для забруднювачів може бути представлене у наступному вигляді:

$$\mathbf{U}^{n+1} = \mathbf{U}^n + \Delta t \cdot (\mathbf{S} - \nabla \cdot \mathbf{F}), \quad (5)$$

де $\mathbf{U}$ - вектор змінних (швидкість, тиск, концентрація), $\mathbf{S}$ - джерела сили та маси (наприклад, зовнішні сили), $\mathbf{F}$ - потоки (енергія, забруднювачі), Δt - крок часу.

Для успішного вирішення цих задач важливо використовувати сучасні програмні інструменти, які дозволяють забезпечити високу точність чисельних розрахунків та врахувати специфічні характеристики таких систем, включаючи турбулентність, температурні коливання та забруднення. Оскільки вибір програмного забезпечення безпосередньо впливає на результативність моделювання та його відповідність реальним умовам, проведемо аналіз сучасних програмних комплексів, що використовуються для вирішення цих задач. У сучасному інженерному та екологічному моделюванні для аналізу гідродинамічних процесів використовуються чисельні методи та потужні програмні засоби. Найбільш відповідними до умов дослідження потоків рідини в системах зворотного водопостачання підприємств ГЗК є:

1) ANSYS Fluent — це один з найбільш широко застосовуваних програмних продуктів для моделювання потоків рідин та газів, що працює за допомогою чисельного методу кінцевих об'ємів (FVM) [7,8]. Fluent дозволяє ефективно моделювати як ламінарні, так і турбулентні потоки, а також передбачає інтерфейси для розв'язання рівнянь Нав'є-Стокса, що описують рух рідини, і моделює різні процеси переносу (теплообмін, масоперенос). Програмний продукт також містить вбудовані моделі турбулентності, зокрема $k-\epsilon$ та $k-\omega$, які є корисними для опису поведінки потоків у складних інженерних системах. Основними можливостями системи є:

- моделювання турбулентних і нетурбулентних потоків;
- аналіз теплових процесів та процесів масопереносу;
- інтерфейси для врахування реакцій на забруднювачі;
- інтеграція з іншими інженерними програмами для комплексного аналізу.

2) COMSOL Multiphysics — це програмний продукт для багатоцільового моделювання фізичних явищ, включаючи гідродинаміку, теплоперенос та масоперенос [9]. Він підтримує метод кінцевих елементів (FEM), що дозволяє використовувати складні геометрії та адаптувати моделі для кожної конкретної задачі. COMSOL дозволяє налаштовувати специфічні моделі для систем водопостачання, зокрема для процесів фільтрації, осадження та обробки забруднень. Це дуже гнучкий інструмент, що підходить для моделювання різних параметрів системи, включаючи стани та динаміку турбулентних потоків. Основними можливостями системи є:

- моделювання багато фізичних процесів одночасно (тепло, масоперенос);
- гнучке налаштування моделі за рахунок методу кінцевих елементів;
- підтримка великих обчислювальних задач за допомогою паралельного виконання;
- можливість інтеграції з іншими програмами для розширеного аналізу.

3) OpenFOAM — це відкрите програмне забезпечення для чисельного моделювання, яке спеціалізується на розв'язуванні задач гідродинаміки, термодинаміки, а також процесів переносу [10]. Завдяки відкритому коду, OpenFOAM дозволяє дослідникам адаптувати існуючі моделі і створювати нові для вирішення специфічних задач, включаючи моделювання турбулентних потоків, а також процесів очищення води у зворотних водопостачальних системах. OpenFOAM широко застосовується у наукових дослідженнях завдяки своїй гнучкості та здатності вирішувати складні інженерні задачі. Основними можливостями системи є:

- відкритий код, що дозволяє модифікувати і налаштовувати програму під специфічні задачі;
- підтримка розв'язку рівнянь Нав'є-Стокса та моделей турбулентності;
- моделювання складних геометрій та великих обчислювальних задач;
- підтримка багатофазних потоків та процесів переносу.

4) Matlab/Simulink — популярне середовище для математичного моделювання, яке дозволяє створювати та аналізувати моделі складних фізичних систем, включаючи гідродинамічні процеси [11]. Matlab надає великий набір функцій для чисельного інтегрування рівнянь, а Simulink є зручним інструментом для візуального моделювання та симуляції. Для задач зворотного водопостачання можна використовувати спеціалізовані блоки для моделювання потоків, фільтраційних процесів та забруднень. Крім того, Matlab добре підходить для створення користувацьких функцій, необхідних для специфічних досліджень. Основними можливостями системи є:

- вбудовані функції для чисельного вирішення диференціальних рівнянь та математичних задач;
- підтримка візуального моделювання за допомогою Simulink;
- можливість інтеграції з іншими програмами та математичними пакетами.

На основі проведеного аналізу різних програмних засобів для моделювання потоку рідини в зворотних водопостачальних системах, було розроблено порівняльну таблицю, (Таб.1) що описує їх можливості та функціональні відмінності.

Порівняння можливостей програмних продуктів для моделювання потоків рідини

Програмне забезпечення	Моделювання турбулентних потоків	Моделювання переносу забруднювачів	Моделювання фільтрації	Гнучкість налаштувань	Вартість
ANSYS Fluent	+	+	+	-	Висока
COMSOL Multiphysics	+	+	+	+	Висока
OpenFOAM	+	+	+	+	Низька
Matlab/Simulink	-	+	-	+	Середня

Вибір програмного інструменту для моделювання потоку рідини в системах зворотного водопостачання залежить від конкретних вимог до задачі, доступного бюджету та технічних можливостей. ANSYS Fluent та COMSOL Multiphysics є потужними інструментами, які забезпечують високий рівень точності та великі можливості для налаштувань, однак, їх висока вартість і вимоги до апаратних ресурсів можуть стати бар'єром для малих підприємств чи лабораторій. OpenFOAM будучи відкритим програмним забезпеченням, має значну гнучкість і можливість налаштування під специфічні потреби, що робить його чудовим варіантом для академічних і дослідницьких проєктів. Matlab/Simulink дає можливість ефективно вирішувати задачі з переносу та фільтрації, хоча й потребує додаткових налаштувань для вирішення гідродинамічних задач.

Висновки. Здійснений аналіз дозволяє зробити наступні висновки. Вибір програмного забезпечення для моделювання потоку рідини в системах зворотного водопостачання значною мірою залежить від конкретних вимог задачі та доступних ресурсів. Для великих підприємств, що потребують високої точності та можливості інтеграції з іншими системами, найкраще підходять ANSYS Fluent або COMSOL Multiphysics. Для досліджень або малих підприємств, де важлива гнучкість налаштувань і доступність, варто звернути увагу на OpenFOAM, оскільки він не потребує великих інвестицій у ліцензії і надає великий простір для адаптації. Matlab/Simulink підходить для завдань, що вимагають комплексного моделювання з різними фізичними процесами. Таким чином, для кожної конкретної задачі слід ретельно оцінити не лише можливості програмного забезпечення, але й витрати на його ліцензування, технічні вимоги та рівень підтримки користувачів, щоб забезпечити оптимальні результати у вирішенні задач водопостачання.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Ferziger H. J., Peric M. (2002). Computational Methods for Fluid Dynamics. Springer-Verlag, Berlin, pp. 329–364. DOI: 10.1007/978-3-642-56026-2.
2. Versteeg H. K., Malalasekera W. (2007). An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method. Pearson Education.
3. Roache P. J. (1998). Verification and Validation in Computational Science and Engineering. Hermosa Publishers.

4. Li Z., Bouscasse B., Ducroz G., Gentaz L., Le Touzé D., Ferrant P. (2021). Spectral Wave Explicit Navier-Stokes Equations for wave-structure interactions using two-phase Computational Fluid Dynamics solvers. *Ocean Engineering*, 221, 108513. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108513.
5. Cotas C., Silva R., Garcia F., Faia P., Asendrych D., Rasteiro M. G. (2015). Application of Different Low-Reynolds $k-\epsilon$ Turbulence Models to Model the Flow of Concentrated Pulp Suspensions in Pipes. *Procedia Engineering*, 102, 1326–1335. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.263.
6. Meftah Almukhtar N., Othman M. H. D., Tai Z. S., Kurniawan T. A., Puteh M. H., Jaafar J., Rahman M. A., Ismail A. F., Rajamohan N., Abdullah H., Wong K. Y. (2024). Recent strategies for enhancing the performance and lifespan of low-cost ceramic membranes in water filtration and treatment processes: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 62, 105399. DOI: 10.1016/j.jwpe.2024.105399.
7. Pal S., Kottam R. R., Lambert M. F., Hanmaiahgari P. R. (2024). Estimation of deposit thickness in single-phase liquid flow pipeline using finite volume modelling. *Journal of Pipeline Science and Engineering*, 4(1), 100145. DOI: 10.1016/j.jpse.2023.100145.
8. ANSYS Fluent User's Guide (2021). ANSYS, Inc.
9. Devi R., Upadhyaya Y. K., Manasa S., Abhinav, Tripathi A. (2024). Efficient Solar Cell Using COMSOL Multiphysics. In: Shrivastava V., Bansal J. C., Panigrahi B. K. (eds) *Power Engineering and Intelligent Systems. PEIS 2023. Lecture Notes in Electrical Engineering*, vol. 1097, Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-99-7216-6_8.
10. OpenFOAM User Guide (2020). OpenFOAM. Available at: <https://www.openfoam.com/documentation/>.
- 11 Sun P., Zhao H., Liao L., Zhang J., Su G. (2017). Control system design and validation platform development for small pressurized water reactors (SPWR) by coupling an engineering simulator and MATLAB/Simulink. *Annals of Nuclear Energy*, 102, 309–316. DOI: 10.1016/j.anucene.2016.12.034.

Received 15.01.2025.

Accepted 17.01.2025.

Analysis and justification of the selection of software tools for modeling and automated control of recirculating water supply systems in mining and processing enterprises

This study provides a systematic analysis of software solutions used for modeling and managing recirculating water supply systems. The research focuses on identifying computational tools that are best suited for simulating complex fluid dynamics, turbulence effects, and filtration processes within these systems. The primary objective is to justify the choice of software based on its functional capabilities, accuracy in replicating real-world conditions, and potential for integration into industrial automation frameworks.

The methodology involves a comparative evaluation of existing modeling platforms, assessing their numerical algorithms, interface design, computational efficiency, and adaptability to the specific requirements of mining water management. Expert analysis is applied to determine the advantages and limitations of different software packages in terms of

precision, scalability, and ease of implementation. Key factors considered include the ability to model multiphase flows, predict contaminant transport, and optimize filtration strategies.

The results highlight the strengths and weaknesses of various software tools, providing practical recommendations for their application in system design, process optimization, and operational management. The findings contribute to improving decision-making in the selection of digital solutions for water resource management, leading to enhanced automation, cost-effectiveness, and environmental sustainability. By offering a structured evaluation of modeling and automation tools, this research supports engineers and decision-makers in implementing more effective recirculating water supply systems. The proposed approach facilitates improved process control, reduces water consumption, minimizes pollution risks, and enhances the overall sustainability of mining and processing operations.

Пікільняк Андрій Валерійович – к.т.н., доцент кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет

Pikilniak Andrii – Ph.D., Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering Technology, Kryvyi Rih National University.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТРАДИЦІЙНИХ СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ТА НЕЙРОМЕРЕЖЕВОЇ МОДЕЛІ LSTM

Анотація. У статті здійснено порівняльний аналіз традиційних статистичних методів (ARIMA, SARIMA) та сучасного підходу на основі глибокого навчання (LSTM) для прогнозування часових рядів на фінансових ринках. Аналіз зосереджено на дослідженні ефективності кожної моделі у прогнозуванні ціни закриття акцій компанії Apple (NASDAQ: AAPL). Вибір моделей обумовлений їх широким застосуванням у фінансовому аналізі: ARIMA добре підходить для стаціонарних часових рядів, SARIMA дозволяє враховувати сезонні коливання, а LSTM здатна розпізнавати нелінійні залежності та довготривалі тренди.

Для дослідження використано історичні дані про ціну закриття акцій AAPL за період із 01.01.2023 по 20.01.2025, отримані через сервіс ufinance. Експериментальне моделювання проводилося з метою порівняння точності прогнозування на основі таких метрик, як середня абсолютна похибка (MAE), середньоквадратична похибка (MSE), корінь середньоквадратичної похибки (RMSE) та середня абсолютна відносна похибка (MAPE).

Результати аналізу показали, що модель LSTM забезпечує найкращу точність прогнозування завдяки здатності продуктивно моделювати складні патерни у часових рядах. SARIMA також продемонструвала високу ефективність у прогнозуванні, особливо для даних із вираженою сезонною складовою, перевершуючи ARIMA за точністю. Водночас ARIMA продемонструвала найгірші результати через обмежену здатність адаптуватися до сезонності та нелінійних залежностей.

Одержані висновки можуть бути корисними для аналітиків, інвесторів та дослідників, що займаються фінансовим прогнозуванням. Робота містить практичні рекомендації щодо вибору моделі залежно від характеристик даних і потреб прогнозування, а також висвітлює сильні та слабкі сторони кожного підходу.

Ключові слова: прогнозування часових рядів, ARIMA, SARIMA, LSTM, фінансові ринки, машинне навчання, нейронні мережі, оцінка точності, фондовий ринок, моделювання даних

Постановка проблеми. У сучасному світі аналіз та прогнозування даних стали важливою складовою багатьох галузей, від фінансів і маркетингу до медицини та енергетики. Традиційні статистичні методи та сучасні підходи на основі машинного навчання часто використовуються для аналізу часових рядів – одного з найпоширеніших

типів даних. Серед них виділяються ARIMA (авторегресійна інтегрована модель ковзного середнього), SARIMA (сезонна авторегресійна інтегрована модель ковзного середнього) та LSTM (довготривала короткочасна пам'ять), які демонструють різний підхід до прогнозування часових рядів.

У роботі розглянемо ключові особливості наведених моделей, їхні сильні та слабкі сторони, а також типові сценарії використання. ARIMA та SARIMA представляють класичні статистичні методи, які базуються на математичних залежностях у даних, тоді як LSTM, як частина нейронних мереж, використовує переваги глибокого навчання для роботи зі складними та нелінійними залежностями.

Мета дослідження. Провести аналіз придатності моделей ARIMA, SARIMA та LSTM для прогнозування часових рядів на ринку цінних паперів. Зокрема, дослідити точність та якість прогнозування, а саме оцінити, як кожна з моделей справляється з передбаченням на короткі та довгі періоди, у тому числі: при прогнозуванні цін на фондовому ринку. Планується визначити сильні та слабкі сторони представлених моделей, а саме: встановити переваги та обмеження кожної з них, з урахуванням складності даних, часових рамок для тренування і стійкості до шуму та аномалій. Окрім того, надати практичні рекомендації для дослідників і інженерів щодо вибору відповідної моделі, яка буде задовільняти вимогам поставленого завдання, враховувати специфічні дані та виконувати якісне прогнозування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання прогнозування зміни ціни фінансових активів за допомогою технічних індикаторів здебільшого вивчається зарубіжними дослідниками, що пов'язано з доступністю інструментів і високим рівнем обізнаності у цій сфері. Серед праць українських авторів можна виділити наступні: Григор'єв І. А., Сорокін В. О., які в своїй роботі [1] розглядають поєднання статистичних методів і машинного навчання для моделювання цін акцій. Карпова Л. В. розглядає застосування нейронних мереж для аналізу фінансових даних та приклади їх використання в прогнозуванні фондових ринків [2]. Козаченко О. В., Романюк О. А. в своїй роботі аналізують ефективність алгоритмів машинного навчання, таких як Random Forest, SVM, LSTM для прогнозування цін акцій [3]. Кравченко Д. В. в своєму дослідженні акцентує увагу на поєднанні класичних статистичних методів із сучасними підходами машинного навчання [4]. Ладижець В. І., Теренчук С. А. аналізують основні підходи технічного аналізу, включаючи трендові індикатори та осцилятори [5]. Маслій В. В., Березка К. М. в [6] демонструють процес побудови та налаштування ARIMA для економічних прогнозів.

Серед зарубіжних досліджень та публікацій по даній тематиці можна виділити роботи Hyndman R.J. та Box G. E. P., що є комплексними підручниками, які описують теорію та практики прогнозування часових рядів [7, 8]. Хаяс А. окреслює основні концепції ARIMA моделі та зосереджується на практичному застосуванні ARIMA [9]. Дослідження S. Siarni-Namini та інші [10] порівнює дві моделі ARIMA та LSTM в прогнозуванні часових рядів та різних сценаріях прогнозування.

Розглянуті роботи демонструють широкий спектр підходів до прогнозування фінансових ринків із використанням ARIMA, SARIMA, LSTM і гібридних моделей.

Викладення основного матеріалу. Часові ряди є важливим інструментом на фондовому ринку, адже вони дозволяють відстежувати динаміку зміни цін на активи в часі. Особливістю часових рядів є їх послідовна природа, де кожен елемент залежить від попереднього, що робить їх ідеальним засобом для створення прогнозів. Враховуючи дані властивості, прогнозування майбутніх значень на основі історичних даних стає можливим за допомогою різноманітних методів – від простих статистичних моделей до складніших методів машинного навчання. У даному дослідженні розглядаються три популярні методи прогнозування: авторегресійна інтегрована модель ковзного середнього (ARIMA), її розширена версія, що враховує сезонні коливання (SARIMA), а також нейромережева модель довготривалої короткочасної пам'яті (LSTM), яка здатна навчатися складним нелінійним залежностям у даних.

ARIMA є базовою технікою прогнозування часових рядів, яка широко використовується в різних сферах, зокрема: у фінансах, економіці та ін. Її здатність моделювати та прогнозувати майбутні значення шляхом аналізу й використання минулих трендів робить цей метод незамінним. Розглянемо основні компоненти ARIMA, особливості її застосування та детальні етапи реалізації.

Абревіатура ARIMA описує три основні компоненти, з яких складається модель, а саме: авторегресія (AR), інтегрування (I) та ковзне середнє (MA). Як відомо, компонент авторегресії використовує минулі значення для прогнозування майбутніх значень, це означає, що при прогнозуванні враховуються попередні дані, останнє дозволяє брати до уваги автокореляцію. Компонент інтегрування стосується процесу диференціювання. У багатьох даних часових рядів існують тренди та шаблони, які роблять значення нестабільними, тобто їх статистичні властивості, такі як середнє або дисперсія, змінюються з часом. Однак стаціонарність є важливою властивістю для продуктивного навчання статистичних моделей. Ковзне середнє стосується залежності помилок або залишків протягом часу. Цей компонент враховує помилки, які виникли при прогнозуванні попередніх значень, і включає їх у поточну оцінку. Інакше велика похибка в одному місяці може негативно вплинути на наступні місяці та збільшити її.

В роботі для стандартного вираження моделі ARIMA пропонується використувати наступну формулу:

$$\Delta^d y_t = \alpha + \sum_{i=1}^p \phi_i \Delta^d y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \epsilon_{t-j} + \epsilon_t, \quad (1)$$

де y_t – значення часового ряду на момент часу t , $\Delta^d y_t$ – різниця ряду ступеня d , різниця першого ступеня записується як $\Delta y_t = y_t - y_{t-1}$, α – константа, ϵ_t – значення біло-

го шуму, $\phi_1, \dots, \phi_p$ – коефіцієнти авторегресійної моделі, $\theta_1, \dots, \theta_q$ – коефіцієнти моделі

ковзного середнього.

Визначення моделі ARIMA (1) для певного часового ряду полягає у виборі значень параметрів p , d і q , що є досить складним завданням. Параметр p позначає порядок авторегресійної частини, d – ступінь різниці ряду, q – порядок частини ковзного середнього [6].

Для визначення параметрів ARIMA: p , d і q використовують два ключових інструменти:

- ACF (функція автокореляції), яка допомагає визначити порядок частини ковзного середнього q , кількість попередніх помилок прогнозу, які потрібно врахувати;
- PACF (функція часткової автокореляції), яка допомагає визначити порядок авторегресійної частини p , кількість врахованих лагів спостережень.

В роботі використовується датасет з цінами закриття акцій компанії Apple (NASDAQ:AAPL) з 01.01.2023 по 20.01.2025 р. з сервісу yfinance [12].

Візуалізація графіків функцій ACF та PACF надає чітке розуміння того, як минулі значення впливають на поточні дані (рис. 1).

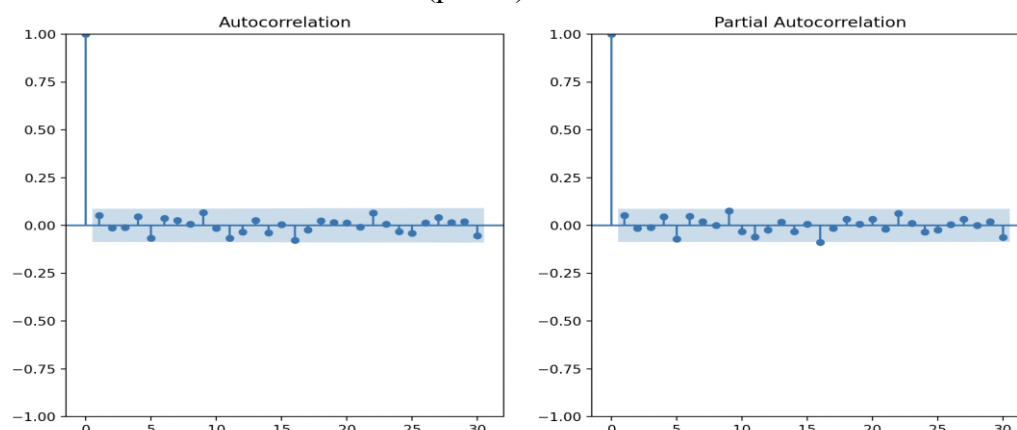


Рисунок 1 – Графіки функцій ACF та PACF

Після проведення чисельних експериментів розрахунку параметрів моделі ARIMA знайдено оптимальні значення для $p = 2$, $d = 1$, $q = 2$. Базуючись на знайдених оптимальних значеннях наведемо графік прогнозу ціни закриття цінного паперу AAPL на тридцять днів в майбутньому (рис. 2).

Модель ARIMA дозволяє робити прогнозування стаціонарних даних, але додавання сезонності та зовнішніх змінних може значно покращити її продуктивність. Оскільки ARIMA припускає стаціонарність часового ряду, необхідно використовувати іншу модель, яка підтримує сезонну складову. Для цього використаємо модель SARIMA, яка являється розширенням моделі ARIMA, додаючи додаткові сезонні компоненти авторегресії та ковзного середнього. Такі додаткові лаги відповідають частоті сезонності (наприклад, дванадцять для місячних даних, двадцять чотири для щоденних).



Рисунок 2 – Графік прогнозу ціни закриття акції AAPL за допомогою моделі ARIMA

Ключовими компонентами моделі SARIMA є сезонні компоненти, які враховують закономірності в даних, а саме те, що вони повторюються з фіксованим інтервалом (щотижня, щомісяця або щороку). В цій частині модель включає сезонну авторегресію (SAR), сезонне інтегрування (I) та сезонне ковзне середнє (SMA). Крім того, модель SARIMA враховує несезонні компоненти, спадкуючи їх обробку від моделі ARIMA та додаткові параметри порядку які визначаються трьома групами параметрів: (p, d, q) для несезонних компонентів і (P, D, Q, s) для сезонних. Наведені параметри задають кількість авторегресивних, різницевих і ковзних середніх членів як для сезонних, так і для несезонних частин моделі.

У роботі використано наступну формулу SARIMA:

$$\Delta^d \Delta_s^D y_t = \alpha + \sum_{i=1}^p \phi_i \Delta^d \Delta_s^D y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j \epsilon_{t-j} + \sum_{k=1}^P \Phi_k \Delta^d \Delta_s^D y_{t-ks} + \sum_{l=1}^Q \Theta_l \epsilon_{t-ls} + \epsilon_t, \quad (2)$$

де Δ_s^D – оператор сезонного диференціювання порядку D з сезонністю S , $\theta_1, \dots, \theta_q$ –

коефіцієнти моделі ковзного середнього, $\Phi_1, \dots, \Phi_k$ – коефіцієнти сезонного авторе-

гресійного (SAR) компонента, P – оператор сезонного авторегресійного процесу,

$\Theta_1, \dots, \Theta_l$ – коефіцієнти сезонного ковзного середнього (SMA) компонента, Q – опера-

тор сезонного процесу ковзного середнього.

Перший набір параметрів (p, d, q) визначає порядок моделі ARIMA, а $(P, D, Q)s$ відповідає за сезонні компоненти. Зокрема, P, D, Q позначають сезонні порядки авторегресії, інтегрування та ковзного середнього відповідно. Параметр s вказує кількість спостережень у кожному сезонному періоді.

Під час чисельних експериментів було використано наступні дані для моделі SARIMA (2): $p = 2, d = 1, q = 2$. Після підрахунку сезонних показників отримаємо

наступні показники моделі: $P = 0$, $D = 1$, $Q = 1$, $s = 24$, де 24 (добова сезонність). Прогноз на майбутні 30 днів зроблений з використанням моделі SARIMA з наведеними параметрами зображений на рисунку 3.

Таким чином, використання ARIMA моделі доцільно тоді, коли дані мають чіткий тренд і є нестационарними. Перевагами цієї моделі є вміння працювати зі складними шаблонами даних, вона підходить для короткострокових і довгострокових прогнозів та є гнучкою у врахуванні різних типів сезонності та трендів. Звісно, що є обмеження, які потребують великого обсягу даних для точного моделювання, модель може бути складною для налаштування, що відноситься до фондового ринку тому, що данні постійно змінюються і вони не завжди мають чіткий тренд. Крім того, ця модель не підходить для даних зі структурними зламами або нелінійними залежностями [13].



Рисунок 3 – Графік прогнозу ціни закриття акції AAPL за допомогою моделі SARIMA

Очевидно, що виникає необхідність розглядати інші моделі, які більш комплексно можуть враховувати додаткові параметри часових рядів, а саме: модель SARIMA, яка враховує сезонність, що, у свою чергу, підвищує точність прогнозів для часових рядів із сезонними коливаннями, крім того модель підходить для опису різноманітних сезонних шаблонів. Додаймо, що модель широко підтримується в статистичних бібліотеках, зокрема, на мові програмування Python (наприклад, statsmodels). Проте, як і всі моделі, які працюють з часовими рядами, вона має ряд особливостей з її використанням, а саме: вибір моделі ускладнюється через додаткові параметри. Крім того, необхідно ретельно проводити діагностику залишків і перевірку моделі на похибки. Додамо, що ще одним фактором є те, що для надійної оцінки сезонних компонентів може знадобитися довший часовий ряд.

Хоча традиційні статистичні моделі добре справляються із задачами, пов'язаними з часовими рядами, сучасні технології пропонують більш вдосконалені підходи для прогнозування майбутніх значень. Одним із таких є використання нейронних мереж, зокрема, моделі Long Short-Term Memory (LSTM) [14, 15]. Як відомо, LSTM є спеціалізованою рекурентною нейронною мережею типу (RNN – Recurrent Neural Networks), яка розроблена для аналізу послідовних даних, таких як часові ряди. Завдяки

здатності зберігати довготривалі залежності, LSTM демонструє високу продуктивність у прогнозуванні. Як зазначається в [11] «Комірка LSTM забезпечує ще ефективніше збереження довготривалої пам'яті, оскільки дозволяє навчатись більшій кількості параметрів. Це робить її однією з найсильніших рекурентних нейронних мереж для прогнозування, особливо коли у даних спостерігається довготривалий тренд. LSTM сьогодні вважається однією з найбільш передових моделей для прогнозування». Зв'язки між компонентами мережі LSTM приведені на рисунку 4.

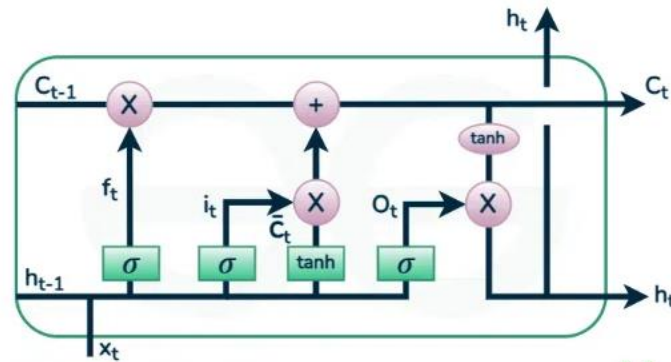


Рисунок 4 – LSTM комірка

Ключовим елементом мережі LSTM є стан комірки, який передається від входу до її виходу. Завдяки цьому, стан комірки забезпечує потік інформації через весь ланцюг із мінімальними лінійними діями через три гейти. Таким чином, стан комірки виступає як довгострокова пам'ять LSTM.

Як відомо, нейронна мережа Long Short-Term Memory була розроблена для подолання проблеми довгострокових залежностей, оскільки мережа використовує гейти для контролю процесу збереження інформації.

Першим етапом у створенні LSTM є визначення, яка інформація є непотрібною і має бути виключена з комірки на цьому кроці. Такий процес ідентифікації та виключення даних здійснюється за допомогою сигмоїдної функції σ , яка отримує на вході значення з попереднього блоку LSTM(h_{t-1}) на момент часу $t-1$ та поточний вхід x_t на

момент часу t . Сигмоїдна функція, крім того, визначає, яку частину попереднього результату потрібно видалити. Розглянуті гейти називаються гейтами забуття і позначаються як f_t .

$$f_t = \sigma(W_{f,x}x_t + W_{f,h}h_{t-1} + b_f), \quad (3)$$

де f_t – гейт забуття, вихідні значення якого варіюються від 0 до 1, де нуль означає повне забуття інформації, а одиниця – повне збереження, що відповідає кожному числу в стані комірки, h_{t-1} – прихований стан моменту часу $t-1$ та поточний вхід x_t , W_f та b_f – відповідно вагова матриця та зміщення гейта забуття.

Наступним етапом є прийняття рішення щодо збереження інформації з нового входу (X_t) в стан комірки, а також оновлення цього стану. Процес включає два рівні:

сигмоїдний шар та другий шар гіперболічний тангенс $\tanh$. Сигмоїдний рівень визначає чи слід оновлювати нову інформацію або ігнорувати її (нуль або одиниця), а функція $\tanh$ надає вагу значенням, які пройшли через попередні етапи, оцінюючи їх важливість (від -1 до +1). Обидва значення множаться, щоб оновити стан комірки, і ця нова пам'ять додається до старої пам'яті, що призводить до нового стану комірки C_t .

$$i_t = \sigma(W_i[h_{t-1}, X_t] + b_i), \quad (4)$$

де i_t – вхідний венти́ль, який визначає, скільки інформації надходить від поточного входу до стану комірки;

$$\bar{C}_t = \tanh(W_c[h_{t-1}, X_t] + b_c), \quad (5)$$

$$C_t = C_{t-1}f_t + \bar{C}_ti_t, \quad (6)$$

де W_i , W_c , b_i , b_c – вагові матриці та зсув, відповідно, стану комірки; C_t – стан осередку, у якому зберігаються як короткострокова, так і довгострокова пам'ять в момент часу t .

На останньому етапі вихідні значення (h_t) базуються на стані вихідної комірки (O_t), але є відфільтрованою версією цього стану. Сигмоїдний шар визначає, які частини стану комірки потрапляють на вихід. Далі вихідний сигнал сигмоїдного вентиля (O_t) множиться на нові значення, створені шаром $\tanh$ зі стану комірки (C_t), де значення знаходяться в діапазоні від -1 до +1.

$$O_t = \sigma(W_o[h_{t-1}, X_t] + b_o); \quad (7)$$

$$h_t = O_t * \tanh(C_t) \quad (8)$$

де O_t – вихідний венти́ль, який визначає, скільки інформації з поточного стану передається до прихованого, дозволяючи мережі вибирати між довгостроковою або короткостроковою пам'яттю, коли це необхідно; h_t – прихований стан, що містить інформацію про стан виведення та розраховується на основі поточних вхідних даних і попереднього прихованого стану. Прихований стан може витягти лише короткострокову або

довгострокову пам'ять, або обидві пам'яті, які зберігаються у стані комірки для передбачення; W_o і b_o – вагові матриці та зсув відповідно для вихідного вентиля; $\tanh$ –

функція, яка масштабує значення комірки в діапазоні від -1 до +1.

Під час проведення чисельних експериментів було побудовано нейронну мережу з параметрами, які наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри розробленої моделі

Параметри	Значення
Кількість входів	1
Кількість LSTM шарів	50
Крок часу	60
Розмір пакета	32
Оптимізатор	Adam
Функція втрат	Середня квадратична похибка
Епохи	50

Програмний інструментарій створено за допомогою мови програмування Python, яка широко застосовується в галузі штучного інтелекту. Для побудови та навчання моделі використовувалась бібліотека Keras, а для масштабування даних був використаний модуль `sklearn.preprocessing`.

Без обмеження суджень, зауважимо, що отримані данні були поділені на навчальну та тестову вибірки у пропорції вісімдесят до двадцяти. Як відомо, перша частина використовується для навчання, а друга – для перевірки її точності. Результати навчання моделі з обраними параметрами в розрізі зміни функції втрат протягом етапу навчання з залученням окремого тестувального набору даних (рис. 5).

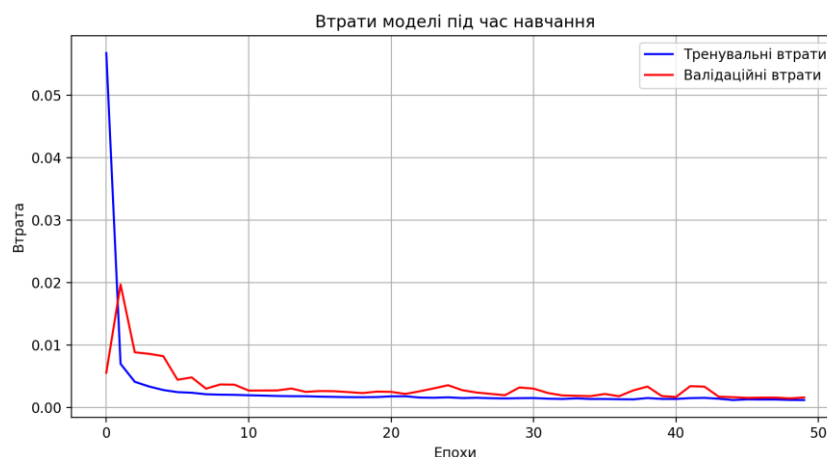


Рисунок 5 – Зміна значення функції втрат протягом навчання моделі

Результати прогнозування на тестових та тренувальних даних наведені на рисунку 6.

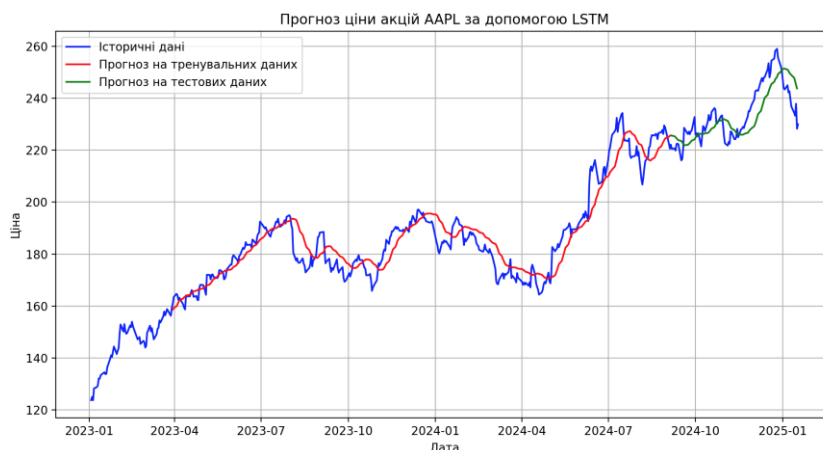


Рисунок 6 – Графік прогнозу за допомогою LSTM на тренувальних та тестових даних

Результати прогнозування на майбутні тридцять днів представлено на рисунку 7.



Рисунок 7 – Графік прогнозу за допомогою LSTM на майбутні 30 днів

Під час роботи з кожною з моделей ARIMA, SARIMA та LSTM було створено відповідний прогноз ціни закриття акції AAPL на тридцять днів. Загальний вигляд прогнозіваних значень представлено на рисунку 8.



Рисунок 8 – Графік порівняння результатів прогнозування ціни закриття цінного паперу AAPL на майбутні 30 днів за допомогою ARIMA, SARIMA та LSTM

Для оцінки якості роботи кожної моделі було обрано такі метрики: MAE (Mean Absolute Error), MSE (Mean Squared Error), RMSE (Root Mean Squared Error) та MAPE (Mean Absolute Percentage Error), які є відомими та не потребують додаткових пояснень.

Метрику MSE включено до аналізу, оскільки саме вона мінімізується під час навчання моделі. RMSE використовується, оскільки є квадратним коренем із MSE і відображає якість моделі дещо інакше. Як відомо, якщо MSE дає загальне уявлення про величину похибки, то RMSE має той самий масштаб, що й вихідні дані, і, як наслідок, є зручнішою метрикою для інтерпретації отриманих результатів.

Важливо зазначити, що оцінки MSE та RMSE підкреслюють вплив великих похибок, оскільки похибки підводяться у квадрат перед усередненням і тому це робить метрику RMSE більш чутливою до викидів. Однак така чутливість може бути недоліком, тому для більш збалансованої оцінки якості прогнозів додатково використовуються MAE та MAPE, які менш залежні від аномальних значень. Отримані чисельні результати прозглянутих метрик наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Обчислені метрики точності ARIMA, SARIMA та LSTM

Метрика \ Моделі	MAE	MSE	RMSE	MAPE
ARIMA	8,4159	144,8973	12,0373	3,4804
SARIMA	7,7675	89,3812	9,4542	5,1187
LSTM	6,8124	42,8118	8,0669	2,8784

Після проведених чисельних експериментів та аналізу отриманих результатів метрик точності кожної з моделей, можна зробити висновок, що модель LSTM забезпечує найнижчі похибки за всіма показниками. SARIMA показала, що є прийнятною альтернативою але її точність поступається LSTM. ARIMA має найнижчу точність, що робить її менш придатною для точного прогнозування в цьому випадку.

Висновки. В роботі було розглянуто основні характеристики використаного часового ряду: акцій компанії Apple; реалізовано графічне представлення прогнозування; досліджено найпоширеніші методи прогнозування, такі як: авторегресійна інтегрована модель ковзного середнього (ARIMA), сезонна авторегресійна інтегрована модель ковзного середнього (SARIMA) та нейронна мережа довготривала короткочасна пам'ять (LSTM). В якості даних було використано датасет з вартостями закриття цінного паперу AAPL з 01.01.2023 року по 20.01.2025 року.

Виконано прогнозування цін на майбутні тридцять днів при застосуванні кожної з розглянутих моделей. Представлено отримані результати чисельних експериментів у вигляді відповідних графіків. Проведено аналіз метрик оцінювання якості роботи кожної з моделей, який дозволяє зробити висновок, що модель LSTM показує найкращі результати, оскільки найбільш адаптована для подібних задач прогнозування часових рядів на фондовому ринку. Надано рекомендації щодо використання розглянутих у роботі моделей та наведено основні характеристики для кожної з них.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Григор'єв, І. А., Сорокін, В. О. (2020). Гібридні моделі для прогнозування цін акцій на фондовому ринку // Вісник Харківського національного університету. – 2020. – №2. – С. 45-53.
2. Карпова, Л. В. (2018). Нейронні мережі у фінансовому аналізі: теорія та практика застосування // Вісник Київського національного університету. Економіка. – 2018. – №4. – С. 90-98.
3. Козаченко, О. В., Романюк, О. А. (2020). Прогнозування цін акцій на основі моделей машинного навчання // Економіка та прогнозування. – 2020. – №2. – С. 75-88.
4. Кравченко, Д. В. (2021). Статистичні методи та машинне навчання у фінансових дослідженнях // Фінансовий ринок України. – 2021. – №3. – С. 67-73.
5. Ладижець, В. ., Теренчук, С. . (2021). МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ ТЕХНІЧНОГО АНАЛІЗУ ФІНАНСОВИХ РИНКІВ. Управління розвитком складних систем, (48), 47–52. <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.48.47-52>
6. Masliy, V. V., & Berezka, K. M. (2017). Selection and evaluation of ARIMA models for forecasting foreign direct investment. Scientific Bulletin of the International Humanitarian University. Series: Economics and Management, 24(2), 115-119. [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvmgu_eim_2017_24\(2\)_26](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvmgu_eim_2017_24(2)_26)
7. Hyndman R.J., Athanasopoulos G. Forecasting: principles and practice. 3rd ed. Melbourne, Australia : OTexts, 2021. 442 p.
- Reinsel, G. M. Ljung. – New Jersey : John Wiley & Sons. – 2015
8. Hayes, A. (n.d.). Autoregressive Integrated Moving Average (ARIMA) Prediction Model. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/a/autoregressive-integrated-moving-average-arima.asp>
9. Box, G. E. P., Jenkins, G. M., Reinsel, G. C., & Ljung, G. M. (2015). Time series analysis: Forecasting and control (5th ed.). Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons Inc. <https://doi.org/10.1111/jtsa.12194>
10. S. Siامي-Namini, N. Tavakoli and A. Siامي Namin, “A Comparison of ARIMA and LSTM in Forecasting Time Series,” 2018 17th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA), 2018, pp. 1394-1401, doi: 10.1109/ICMLA.2018.00227
11. Korstanje J. Advanced Forecasting with Python. Apress, 2021.
12. Yfinance. PyPI. (n.d.). <https://pypi.org/project/yfinance/>
13. Перцев Ю. О., Коротка Л.І. Інноваційний підхід у прогнозуванні часових рядів: від традиційних методів до новаторської моделі TIMESFM. International scientific and technical conference Information Technologies in Metallurgy and Machine building – ITMM 2024. 2024. С. 434-439. (DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2024.01.084)
14. Перцев Ю. О., Коротка Л. І. Порівняння нейронних мереж RNN та LSTM типу при прогнозуванні цін на фондовому ринку. Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем (1-3 листопада 2023 року м. Дніпро, Україна). С. 124-127.

15. Перцев Ю.О., Коротка Л.І. Нейромережеве прогнозування цін на фондовому ринку. International scientific and technical conference Information Technologies in Metallurgy and Machine building (ITMM 2023). 314-317 p.(DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.085)

Received 15.01.2025.
Accepted 17.01.2025.

***Comparative analysis of traditional statistical methods
and the lstm neural network model***

This paper presents a comparative analysis of traditional statistical methods (ARIMA, SARIMA) and a modern deep learning approach (LSTM) for financial time series forecasting. The study focuses on evaluating the efficiency of each model in predicting the closing price of Apple Inc. (NASDAQ: AAPL) stock. These models were selected due to their widespread use in financial analysis: ARIMA is suitable for stationary time series, SARIMA accounts for seasonal variations, and LSTM excels at capturing nonlinear dependencies and long-term trends.

The study is based on historical closing price data of AAPL stock from January 1, 2023, to January 20, 2025, obtained via the yfinance service. The experimental modeling aimed to compare the forecasting accuracy of each method using key performance metrics such as Mean Absolute Error (MAE), Mean Squared Error (MSE), Root Mean Squared Error (RMSE), and Mean Absolute Percentage Error (MAPE).

The results indicate that the LSTM model outperforms ARIMA and SARIMA in forecasting accuracy due to its ability to efficiently model complex patterns in time series. SARIMA also demonstrated strong predictive capabilities, particularly for data with distinct seasonal components, surpassing ARIMA in accuracy. However, ARIMA yielded the lowest accuracy due to its limitations in capturing seasonality and nonlinear dependencies.

These findings provide valuable insights for analysts, investors, and researchers involved in financial forecasting. The study offers practical recommendations on model selection based on data characteristics and forecasting requirements, as well as an overview of the strengths and limitations of each approach.

Keywords: time series forecasting, ARIMA, SARIMA, LSTM, financial markets, machine learning, neural networks, accuracy assessment, stock market, data modeling

Перцев Юрій Олексійович - аспірант кафедри інформаційних систем за спеціальністю 122 «Комп'ютерні науки», Український університет науки і технологій.

Коротка Лариса Іванівна - к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційних систем, Український університет науки і технологій.

Pertsev Yurii Oleksiyovych - Postgraduate at the Department of Information Systems, with a specialty 122 «Computer Science», Ukrainian State University of Science and Technology.

Korotka Larysa Ivanivna - Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate Professor at the Department of Information Systems, Ukrainian State University of Science and Technology.

В.І. Шинкаренко, Р.Р. Чигір

КОНСТРУКТИВНО-ПРОДУКЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРИВИМІРНИХ ФРАКТАЛЬНИХ ПОВЕРХОНЬ

Анотація. Представлено модель та програмне забезпечення для конструктивного моделювання фрактальних тривимірних поверхонь. Розроблено програмний додаток для попередньої підготовки поверхонь. Моделювання виконується на основі конструктивно-продукційного підходу. Основні процеси конструктивно-продукційного моделювання з застосуванням розроблених програмних засобів продемонстровано на прикладі моделей китайських пагод. Використано різні види конструкторів, розроблено мультиконструктор формування тривимірних фрактальних фігур на основі мультисимвольних граматики.

Ключові слова: конструктивно-продукційне моделювання, фрактал, L-система, пагода, конструктор, формальні граматики, поверхні Безьє, програмне забезпечення, інформаційні технології.

Засобами конструктивно-продукційного моделювання (КПМ) [1, 2] виконується формування конструкцій та процесів, з застосуванням уточнюючих перетворень: спеціалізації, інтерпретації, конкретизації та реалізації.

Для відокремлення специфікацій використання конструкторів, були представлені різні види конструкторів, що можуть використовуватися як окремо, так й бути контейнером для інших конструкторів.

Розроблена універсальна програмна система моделювання на основі конструктивно-продукційного підходу «Конструктор 1.1» [3]. Програмна система реалізує принципи моделювання на основі конструкторів та дозволяє проводити багаторазові дослідження зі змінними компонентами, що надає можливість повторного використання конструкторів та спрощення формування близьких за структурою, але різних за природою моделей.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Конструктивно-продукційний підхід [1,2] застосований у різних дослідженнях з моделювання, наприклад, при визначенні раціональних структур даних у оперативній пам'яті, формуванні адаптивних алгоритмів стиснення даних, аналізі природномовних текстів та інших.

Моделювання тривимірних об'єктів виконувалось як засоби конструктивно-продукційного моделювання та із застосуванням інших підходів. Розроблено конструктивно-продукційну модель тривимірних кристалічних ґраток [4].

Ряд досліджень ґрунтується на моделюванні тривимірних об'єктів на основі різного виду кривих [5] та поверхонь [6].

При аналізі досліджень з фрактальних архітектурних споруд [7, 8] здебільшого розглядалися новітня архітектура та елементи декорування, а ніж сама конструкція. На основі цього у даній роботі було вирішено розглядати витoki фрактальної архітектури, які були знайдені у давніх спорудах – китайських пагодах [9].

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка моделей фрактальних тривимірних поверхонь засобами конструктивно-продукційного моделювання.

Викладення основного матеріалу. Дамо визначення основним положенням конструктивно-продукційного моделювання.

Основною одиницею конструювання є конструктор. Узагальнений конструктор [1] визначається як:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle, \quad (1)$$

де M – неоднорідний розширюваний носій, Σ – сигнатура відношень та пов'язаних з ними операцій, Λ – інформаційне забезпечення конструювання: призначення, умови початку та завершення конструювання, правила підстановки та обмеження.

Конструювання виконується внутрішнім та зовнішнім виконавцем/виконавцями. Внутрішнім виконавцем у даному дослідженні виступає розроблений програмний застосунок «Конструктор 1.1».

Зовнішнім виконавцем виступає користувач, що формує базові компоненти конструктора. Інтерфейсом зовнішнього виконавця виступає інтерфейс програмного застосунок, який має у собі форми для визначення уточнюючих перетворень.

Для представлення тривимірних об'єктів розглянули різні представлення у 3D-графіці. Критеріями до вибору становили можливість налаштування деталізації згладжування форми об'єкту та простота моделювання складної фігури з декількох части.

На основі поставлених критерії було обрано поверхні Безьє для формування конструкції моделі.

Для формування тривимірних об'єктів, які будуть використовуватися у конструкторах, було розроблено програмний застосунок «Поверхні Безьє». Через інтерфейс налаштовуються опорні точки та виконується попередній перегляд поверхні (рис. 1).

Розглянемо модель пагоди для подальшого перетворення у вигляд конструктивної моделі. За одиницю відтворення виділимо один рівень споруди, що буде зменшуватися у розмірі до попереднього поверху. Представимо рівень у вигляді множини поверхонь, поєднаних між собою певними сторонами одна до одної формуючи тривимірне зображення. Чотири поверхні поєднуються між собою у представлення рівня (рис. 2).

Для відтворення даної структури за принципами конструктивно-продукційного моделювання розроблено низку конструкторів та їх взаємозв'язки (рис. 3).

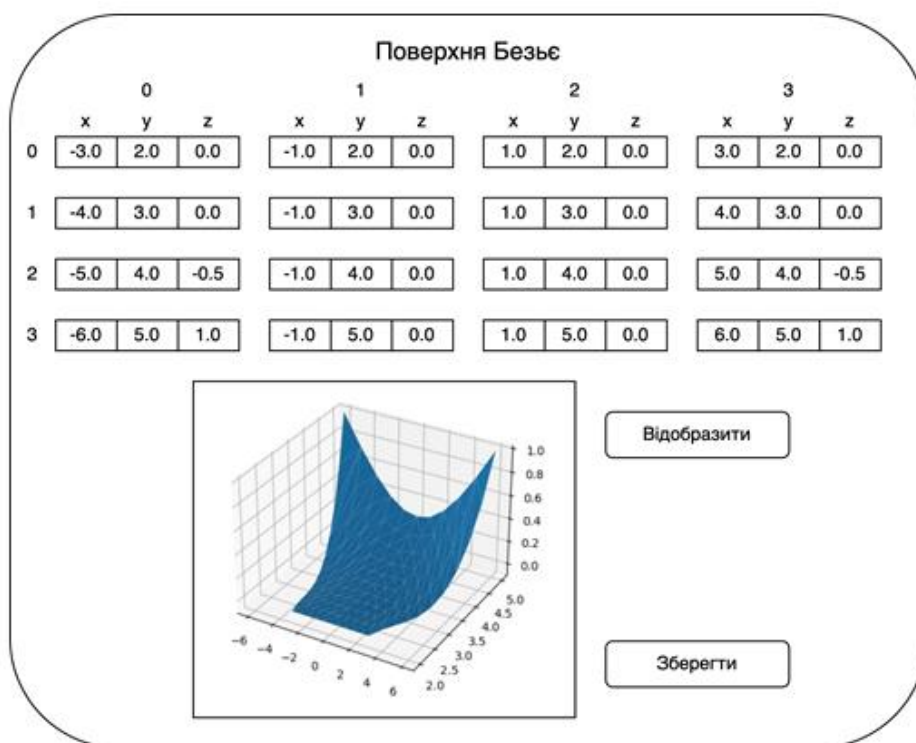


Рисунок 1 — Формування поверхні

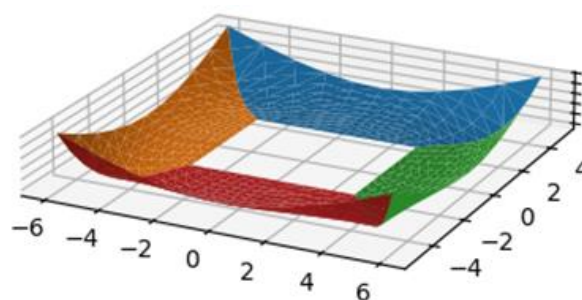


Рисунок 2 — Рівень пагоди

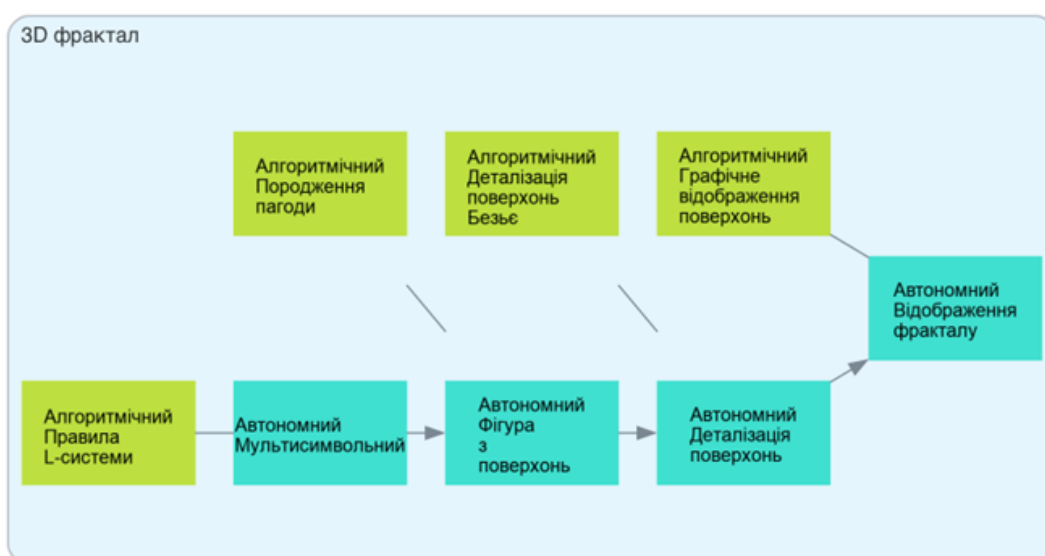


Рисунок 3 — Схема конструкторів

Було розроблено наступні види конструкторів:

- автономний конструктор – базовий незалежний від зовнішніх маніпуляцій конструктор, що акумулює у собі усю необхідну інформацію для отримання реалізації у вигляді конструкції чи конструктивного процесу;
- алгоритмічний конструктор – конструктор, що спеціалізується на реалізації алгоритмів;
- мультиконструктор – конструктор, що складається з автономних та алгоритмічних конструкторів та поєднує їх.

Представимо формування моделей конструкторів у програмному застосунку «Конструктор 1.1».

Розробили автономний конструктор «Мультисимвольний». Даний автономний конструктор породжує мультисимвольний рядок на базі аксіоми. Його структурне наповнення відповідає наповненню породжуючого конструктору з попередньої роботи на базі власного програмного забезпечення [3].

Для отримання даних саме для пагоди, встановлюємо $axioma = "aaaa"$, кількість ітерацій $iter = 8$ та відношення підстановки — $\{a \rightarrow bc\}, \{b \rightarrow a\}$

Кінцевий рядок використаємо при породженні поверхностей об'ємної фігури. Для породження фігури у вигляді пагоди передаватимемо отриманий рядок $axioma_result$ до конструктору породжуючого поверхні.

Розробили автономний конструктор «Фігура з поверхонь», що породжує поверхні на основі мультисимвольного рядку.

Спеціалізація конструктору визначається як:

$$C = \langle M, \Sigma, \Lambda \rangle \xrightarrow{s} {}_s C = \langle M_s, \Sigma_s, \Lambda_s \rangle, \quad (2)$$

де M_s – включає у собі множину терміналів, Σ_s – набір операцій над символами, та інформаційне забезпечення Λ_s – додатково до Λ містить множину змінних й операцій та їх опис.

Визначимо предметну область конструктору як формування структури фігури з набору поверхонь та встановимо основні атрибути, що відповідні для формування послідовностей на основі вхідного набору даних конструктору (рис. 4-5).

Визначимо дані конструювання: кількість ітерацій $iter$ – граничне число кількості ітерацій, $axioma$ та $axioma_result$ – початковий символьний рядок та результуючий рядок символів після виконання ітераційного процесу заміни згідно правил заміни, та набори поверхонь $list_begin$, $list_temp$ та $list_res$ – відповідно початковий, проміжків та результуючий набір. Значення змінних будуть надані при уточнюючому перетворенні конкретизації.

Для інтерпретації, додамо алгоритмічний конструктор «Породження поверхонь» з визначеними алгоритмами для формування набору поверхонь з мультисимвольних послідовностей на основі правил L-систем. Алгоритми формування структури зазначеної форми пагоди також описуються при наповненні.

Спеціалізація

Змінні
Операції

	Назва	Тип	Опис
1	iter	Integer	Кількість ітерацій
2	axiom	String	Початковий символний ...
3	list_begin	List	Початковий набір ...
4	list_temp	List	Проміжковий набір ...
5	list_res	List	Кінцевий набір поверхонь

Додати змінну:
Integer
+

✕
+
✓

Рисунок 4 — Спеціалізація конструктору «Фігура з поверхонь» (змінні)

Спеціалізація

Змінні
Операції

	Операція	Параметри
1	a	(in_list, out1_list, out2_list, out3_list, out4_list)
2	b	(in_list, out_list)
3	c	(in_list, out_list)

Додати операція: з параметрами:
+

✕
+
✓

Рисунок 5 — Спеціалізація конструктору «Фігура з поверхонь» (операції)

На мові програмування Python опишемо алгоритми наповнення поверхонь: use_a – алгоритм формування нової поверхні при якому береться одна поверхня з набору початкових поверхонь та розраховується переміщена та зменшена копія даної з додаван-

ням до набору проміжкових поверхностей, use_b – переміщення поверхностей з проміжкового набору до кінцевого набору поверхностей з додатковим копіюванням до набору початкових поверхностей, та алгоритми підстановки, часткового та повного виводу.

Інтерпретація конструктору «Фігура з поверхонь» ставиться як

$$\langle C_S = \langle M_S, \Sigma_S, \Lambda_S \rangle, C_A = \langle M_A, \Sigma_A, \Lambda_A \rangle \rangle_I \mapsto_I C_S = \langle M_{SI}, \Sigma_{SI}, \Lambda_{SI}, Z \rangle, \quad (3)$$

де C_A – алгоритмічний конструктор, Σ_{SI} що включає у собі сигнатуру послідовного та умовного виводу, та інформаційне забезпечення Λ_{SI} , що включає множину операцій та алгоритмів, а також положення L-систем [10].

Пов'яжемо алгоритмічний конструктор C_A з автономним конструктором «Фігура з поверхонь» (рис. 6).

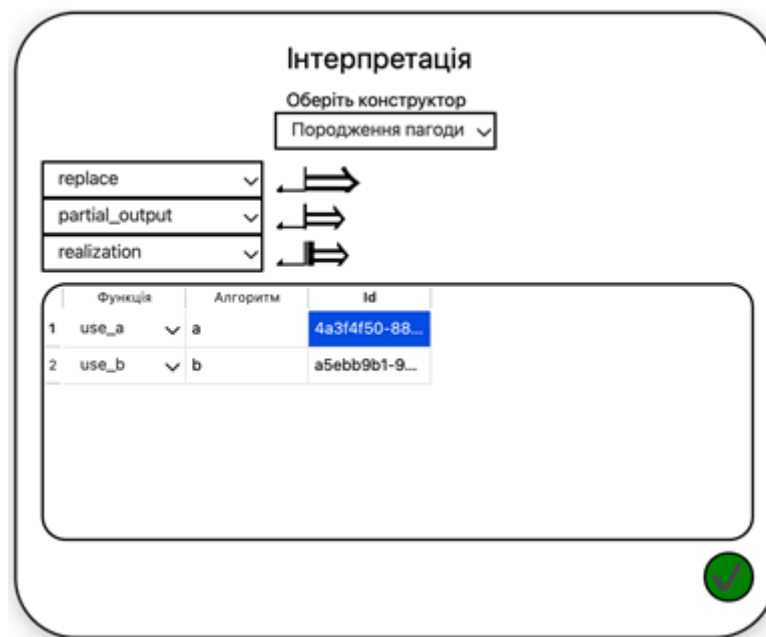


Рисунок 6 - Інтерпретація конструктору «Фігура з поверхонь»

Алгоритми над даними визначаються як $A|_X^Y$, де X – вхідні дані, Y – вихідні дані.

Визначимо алгоритми виконання операцій:

- $A_1^0|_a^{b,c}$ – формування нової частини фігури;
- $A_2^0|_b^a$ – наповнення початкового набору поверхонь;
- $A_3^0|_c^{a,d}$ – наповнення результуючого набору поверхонь;
- $A_4^0|_{l_j, l_h, l_q}^{l_i}$ – підстановка;
- $A_5^0|_{l_j, \psi}^{l_i}$ – частковий вивід;
- $A_6^0|_{l_j, \psi}^{l_i}$ – повний вивід.

Конкретизація конструктору визначається як

$$C_{SI} = \langle M_{SI}, \Sigma_{SI}, \Lambda_{SI} \rangle_K \mapsto_K C_{SI} = \langle M_{SIK}, \Sigma_{SIK}, \Lambda_{SIK} \rangle, \quad (4)$$

де M_{SIK} – розширяємий носій що містить визначений набір термінальних та нетермінальних символів, Σ_{SIK} – множина операції формування рядка, Λ_{SIK} – інформаційне забезпечення процесу конструювання.

При конкретизації визначимо початкові значення даних (рис. 7), як початкова символна послідовність, та задамо правила підстановки (рис. 8).

Назва	Значення
1 iter	8
2 axiom	
3 list_begin	[[[-3.0], [2.0], [0.0], [1.0]], [-1.0], ...]
4 list_temp	[]
5 list_res	[[[-3.0], [2.0], [0.0], [1.0]], [-1.0], ...]

Рисунок 7 – Конкретизація конструктору «Фігура з поверхонь» (змінні)

Правило	Дія
1 a -> bc	
2 b -> a	

Рисунок 8 — Конкретизація конструктору «Фігура з поверхонь» (правила)

Носій M_{SIK} включає у собі набір $\{a, b, c\}$ нетермінальних символів.

Сигнатура операцій Σ_{sIK} містить $\{',','\}$.

Множина правил підстановки визначається як

$$\psi: \langle s, g \rangle \in \Psi, \quad (5)$$

де s – відношення підстановки, g – набір операцій над атрибутами.

Відношення підстановки – двомісне відношення з атрибутами $w_i l_i \rightarrow w_j l_j$.

Визначається при конкретизації Λ_K наступне:

- мета конструювання — наповнення набору поверхонь для формування багато-рівневої тривимірної фігури на основі мультисимвольного рядка;
- обмеження — операції над атрибутами відсутні, кожне правило підстановки містить лише одне відношення підстановки;
- початкові умови — початкова аксіома $axioma = ""$, набір поверхонь $list_begin$ та $list_res$ містить по чотири моделі поверхні розміщені у вигляді рівня пагоди, кількість ітерацій $iter = 1$;
- умова завершення — виконання кількості ітерацій $iter$.

Пов'яжемо основні операції необхідні для формування пагоди з символами. При кожному символі «а» розраховується для однієї з поточних поверхонь рівня зменшена копія з перенесенням у здовж осі, після чого зберігається поверхня у двох списках – у списку нових поверхонь $list_begin$ та у списку усіх поверхонь споруди $list_res$. При кожному символі «b» переноситься одна з поверхонь списку нових поверхонь $list_temp$ до списку поточних поверхонь $list_begin$. При кожному символі «с» переноситься одна усі поверхні зі списку $list_res$ до списку поточних поверхонь $list_begin$.

При формуванні фігури за описаними правилами, для нового рівня потрібно взяти кожен з поверхонь поточного рівня та зменшити на відповідний коефіцієнт зменшення з перенесенням усіх точок поверхні у здовж координатної осі паралельно до попереднього стану. Попередній стан заздалегідь зберегти для відтворення структури поверхонь (рис.9).

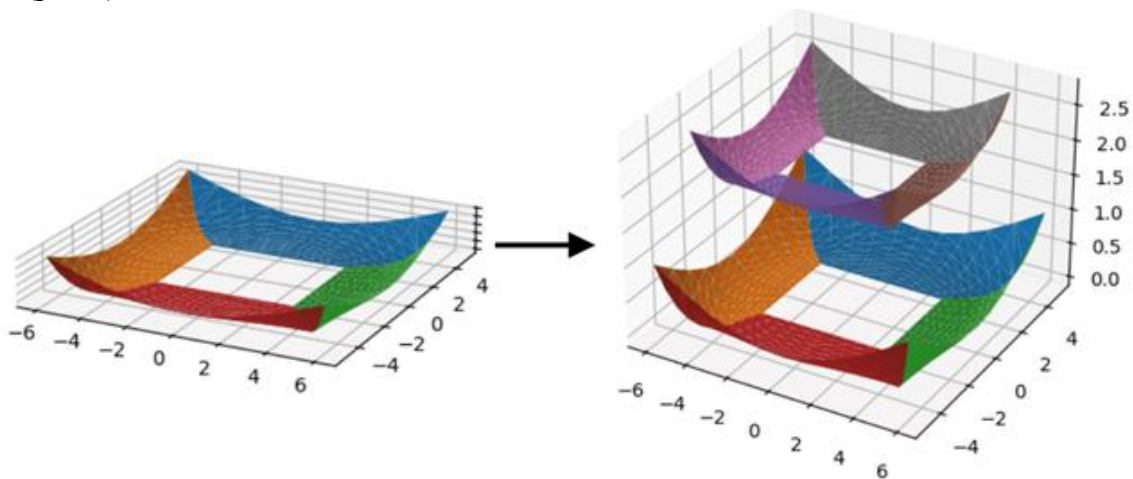


Рисунок 9 - Формування рівнів

Після визначення спеціалізації, інтерпретації та конкретизації, можливо перейти до реалізації на основі них.

Реалізація конструктору визначається як

$$C_{SIK} = \langle M_{SIK}, \Sigma_{SIK}, \Lambda_{SIK} \rangle_R \mapsto \Omega(C), \quad (6)$$

де $\Omega(C)$ – конструкція породжена конструктором C .

При реалізації, даний конструктор сформує набір поверхонь, Безьє для кількості рівнів-ітерацій, описаної при конкретизації.

Аналогічно до розробки конструктору «Фігура з поверхонь» розроблюємо конструктор формування набору точок тривимірного зображення поверхностей «Деталізація поверхностей» та конструктор для формування тривимірного зображення «Відображення фракталу».

Таким же чином як показано на рис. 4-8, визначаємо параметричні конструктори та алгоритмічні конструктори. Після визначення усіх автономних та параметричних конструкторів з відповідними алгоритмічними конструкторами, поєднаємо їх в один послідовний процес формування конструкції у мультиконструкторі. Додамо мультиконструктор «3D фрактал» до списку конструкторів.

На етапі спеціалізації визначимо послідовність дій з додавання конструкторів, формування конструкцій та передачі даних між конструкторами (рис. 10).

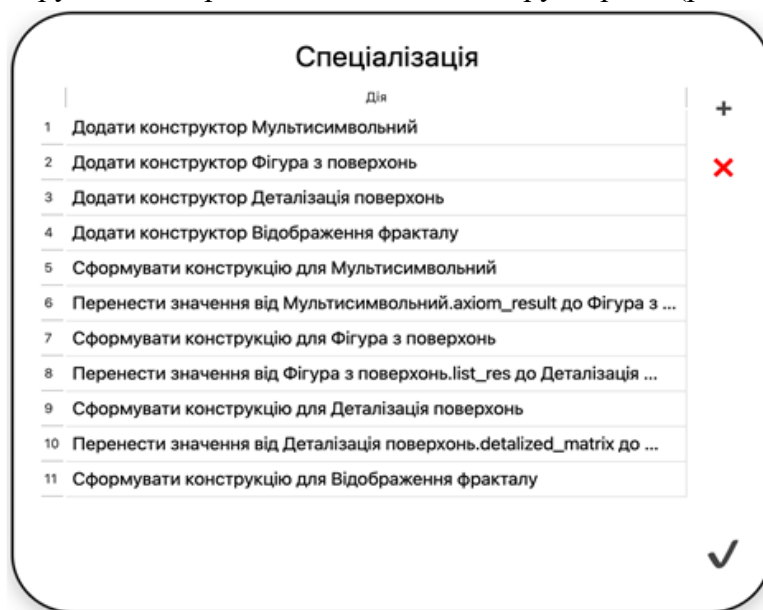


Рисунок 10 — Спеціалізація мультиконструктору «3D фрактал»

Після ітеративного процесу утворюється зображення багатоповерхневої пагоди у відповідності до кількості ітерацій. Кількість ітерацій відповідає кількості рівнів що доповнюють пагоду від початкового рівня (рис.11).

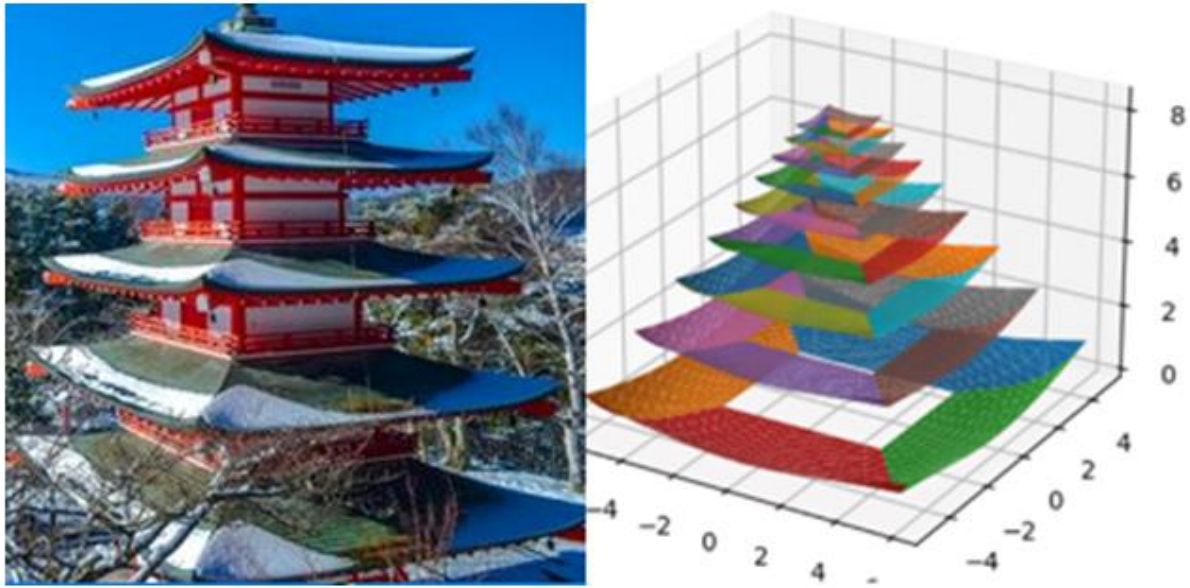


Рисунок 11 - Китайська пагода та її фрактальна модель

Висновки. У результаті розроблено моделі конструкторів та мультиконструкторів тривимірних фігур. Розроблені конструктори дозволяють змінювати початкові форми фігур та налаштовувати алгоритми утворення нових фігур на основі початкових.

Змінюючи алгоритми або підміняючи поверхні, можливо утворювати різні комплексні тривимірні фрактальні зображення, використовуючи у свої основі вже розроблену послідовність дій у мультиконструкторі. Були розглянуті складні фігури, що утворені поєднанням декількох поверхностей в єдину, та складені, які утворюють фігуру з декількох об'єктів.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Shynkarenko V.I., Ilman V.M. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. Part I. Generalized Formal Constructive-Synthesizing Structure // Cybernetics and Systems Analysis. 2014. T. 50, №5. Pp. 662–665. DOI: 10.1007/s10559-014-9655-z.
2. Shynkarenko V.I., Ilman V.M. Constructive-Synthesizing Structures and Their Grammatical Interpretations. Part II. Refining Transformations // Cybernetics and Systems Analysis. 2014. T. 50, №6. Pp. 829–841. DOI: 10.1007/s10559-014-9674-9.
3. Shynkarenko V.I., Chyhir R.R. Constructive-Synthesizing Modelling of Multifractals Based on Multiconstructors // Proceedings of the 14th International Scientific and Practical Programming Conference (UkrPROG 2024). 2024. Vol. 3806, Pp 75-88.
4. Shynkarenko V.I., Letuchyi O.Y., Chyhir R.R. Constructive-synthesizing modeling of fractal crystal lattices // Proceedings of the 18th IEEE International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT). 2023. DOI: 10.1109/CSIT61576.2023.10324251.
5. Tubić D., Hébert P., Laurendeau D. 3D surface modeling from curves // Image and Vision Computing. 2004. Vol. 22, No. 9. Pp. 719–734.
6. Vucina D., Lozina Z., Pehnec I. Computational procedure for optimum shape design based on chained Bezier surfaces parameterization // Engineering Applications of Artificial Intelligence. 2012. Vol. 25, No. 3. Pp. 648–667.

7. Yildiz M.A., Yildiz M.E., Beyhan F. Developing dynamic and flexible façade design with fractal geometry // Journal of Architectural Sciences and Applications. 2023. Vol. 8, No. 1. Pp. 1–14.
8. Al-Dabbagh A.A., Ismail K.J.A. Using Fractal Geometry in Studying Architectural and Urban Patterns // International Journal of Sustainable Development & Planning. 2024. Vol. 19, No. 6.
9. Alghar M.Z., Walidah N.Z., Marhayati M. Ethnomathematics: The exploration of fractal geometry in Tian Ti Pagoda using the Lindenmayer system // Alifmatika: Jurnal Pendidikan dan Pembelajaran Matematika. 2023. Vol. 5, No. 1. Pp. 57–69.
10. Prusinkiewicz P. Lindenmayer A. The Algorithmic Beauty of Plants // Springer Science & Business Media. 2012.

Received 31.01.2025.

Accepted 03.03.2025.

Constructive-synthesizing modelling of three-dimensional fractal surfaces

The study considers the fractal properties of architectural structures, in particular, multi-tiered structures such as a pagoda. The pagoda is an example of a building where each level repeats the geometric motif of the previous one, decreasing in scale but maintaining the overall structure and proportions.

Representation of the pagoda model using fractal geometry and Bézier surfaces to reproduce curved elements is the main element of the work. An algorithm for the formation of an architectural structure, where each level is modelled on the basis of the previous one through a sequential reduction of its geometric elements, is proposed. The formation is carried out with the help of constructors based on constructive-synthesizing modelling. This approach allows for the automatic creation of new levels of the structure while maintaining their self-similarity.

One of the key tools used in the work is parametric constructors, which allow generating three-dimensional images of multi-level structures.

Particular attention is paid to Bezier surfaces, which are used to build curved elements at each level of the pagoda, ensuring smooth transitions between surfaces. The algorithmic constructors allows you to interactively adjust the parameters of the structure by changing the number of levels, their proportions and geometric features.

As a result, a set of algorithms and tools for building fractal structures has been presented that can be used both in architectural design and in modelling complex geometric shapes. The process of creating such models is described in detail through an iterative approach, where each level of the structure is the result of modifying the previous one according to clearly defined rules.

Шинкаренко Віктор Іванович - д.т.н., професор кафедри «Комп'ютерні інформаційні технології» Українського державного університету науки і технологій.

Чигір Роберт Романович - аспірант кафедри «Комп'ютерні інформаційні технології» Українського державного університету науки і технологій.

Shynkarenko Viktor - Doctor of engineering's sciences, Professor of the Department of Computer Information Technologies at Ukrainian State University of Science and Technologies.

Chyhir Robert - PhD student in the Department of Computer Information Technologies at Ukrainian State University of Science and Technology.

**APPLICATION FOR DATA PROCESSING AND ANALYSIS
OF MEASUREMENT DATA OF THE CONCENTRATION-DEPENDENT
DIELECTRIC PERMITTIVITY OF TWO-COMPONENT COMPOSITES**

Abstract. The article presents the results of using computer technologies for data processing and analysis in dielectric measurements, structural control, and properties of polymer composite materials and heterogeneous dielectrics. The algorithm used allows the identification of the structure of non-homogeneous dielectrics with conductive inclusions by analyzing the experimental concentration dependence of static dielectric permittivity. It helps to determine whether their structure corresponds to known models of matrix systems or statistical mixtures. The developed application can be seen as part of the software for creating an automated system for scientific research in the field of electronics of heterogeneous structures and materials, and it can also be used autonomously.

Keywords: automation of dielectric research, data processing, heterogeneous dielectrics, application, Mathcad program, interface design.

Problem statement. The processing of experimental data to obtain information about the physical and physicochemical properties of various materials is one of the key tasks in their research and technical application. This procedure is usually associated with the need to use appropriate mathematical models and perform non-trivial mathematical operations.

The use of computer technologies for these purposes, in particular, intelligent information-measuring systems [1–5], significantly reduces the labor intensity of the process and improves the accuracy of the results obtained.

One of the areas where such an approach is particularly relevant is the processing and analysis of experimental data in dielectric research and the control of properties of ceramic varistor and polymer composite materials and heterogeneous dielectrics in general [6–11].

An important aspect in the development of such semiconductor heterogeneous materials is the study of the influence of their structure, the properties of the polymer matrix, and the filler, as well as the physicochemical interaction between them, on the electrophysical properties of the composites in general [12–14].

Dielectric spectroscopy for this type of two-component systems is one of the most effective methods for studying the structural features and mechanisms of electrical conductivity formation.

A particular interest lies in studying the dependence of electrical conductivity and dielectric permittivity on the concentration (volume fraction) of the filler, as this allows the anal-

ysis of percolation phenomena and effects related to the formation of transition phases with different physical properties from the original components of the composites [15–17].

Research objective. The aim of the research is to create an application for automating the processing and analysis of experimental concentration dependence of static dielectric permittivity of heterogeneous dielectrics with conductive inclusions in order to determine whether their structure corresponds to matrix systems or statistical mixtures.

The algorithm implemented in the application is based on the use of the most well-known models for describing the dielectric properties of two-component dielectrics: the Bruggemann-Hanai model for matrix systems and the Boettcher-Hsu model for statistical mixtures [15, 18].

Presentation of the main material of the research. To develop an effective algorithm for processing and analysis, it is necessary to analyze the physical foundations of the process.

Within the framework of the matrix system model (Bruggemann-Hanai) [4,12,14], the concentration dependence of the static dielectric permittivity of a two-component system ε_{ml} with conductive inclusions in an insulating environment (matrix) is described using the following expression:

$$\varepsilon_{ml} = \varepsilon_d \cdot (1 - p_V)^{-1/A} \quad (1)$$

where ε_d , p_V and A are the relative dielectric permittivity of the matrix, volume fraction, and depolarization factor of the conductive particles, respectively. It is generally assumed that the particles have an ellipsoidal shape, and A can vary from 0 to 1 [19–21]. In the case of unordered inhomogeneous (isotropic) systems, the particles are considered spherical, and $A = 1/3$.

For a statistical mixture, the dependence of static dielectric permittivity ε_{sl} on the volume fraction is described by the Boettcher-Hsu model [18], and it can be written as [20,22]:

$$\varepsilon_{sl} = \varepsilon_d \cdot p_{th} \cdot (p_{th} - p_V)^{-1} \quad (2)$$

where p_{th} — is the threshold (percolation) value of the volume fraction of the conducting component [14].

As can be seen from (2), as $p_V \rightarrow p_{th}$, the low-frequency dielectric permittivity of the statistical mixture ε_{sl} increases infinitely.

For a two-component statistical mixture with spherical particles in the Boettcher-Hsu model, the theoretical value of $p_{th} = 1/3$ [20,22].

It should be noted that in a number of known theoretical models of electrical conductivity in two-component media, the percolation threshold is determined by an expression of the form $p_{th} = z/2$, where z — is the number of bonds between homogeneous particles located at the nodes of a particular lattice (the bond model) [23]. Depending on the degree of order and physical properties, it has been shown that the percolation threshold value p_{th} can vary from 0,05 to 0,6 [23-26].

The unknown parameters in (1) and (2) are A and p_{th} . The condition for applying either of the models in a specific real situation is the possibility of approximating the experimental dependence $\varepsilon_{IE}(p_{VE})$ in the coordinates $[\log(1 - p_{VE}); \log(\varepsilon_{IE})]$ or $[\log(p_{th} - p_{VE}); \log(\varepsilon_{IE})]$ with a straight line [25,27].

The description of the main operations of the developed algorithm can be outlined as follows:

1. For applying the least squares method [28], the experimental data for the concentration dependence of the low-frequency dielectric permittivity are presented in relative coordinates such as $[y_E^i = \log(\varepsilon_{IE}^i/\varepsilon_{IE}^0); x_{E1}^i = \log(1 - p_{VE}^i)]$ and $[y_E^i = \log(\varepsilon_{IE}^i/\varepsilon_{IE}^0); x_{E2}^i = \log(p_{th} - p_{VE}^i)]$. Here, ε_{IE}^i and p_{VE}^i - the experimental values ($i = 0, 1, \dots, n-1$; n — is the number of experimental points).

2. The theoretical approximating expressions (1) and (2) are rewritten as:

$$y_1(p_V, A) = -\log[(1 - p_V)/(1 - p_V^0)]/A \quad (3)$$

$$y_2(p_V, p_{th}) = -\log[(p_{th} - p_V)/(p_{th} - p_V^0)] \quad (4)$$

3. To determine the unknown parameters A та p_{th} the following target functions must be minimized:

$$F_k(a_k) = \sum_{i=0}^{n-1} [y_E^i - y_k(p_{VE}^i, a_k)]^2 \quad (5)$$

where $k = 1-2$; $a_1 = A$ та $a_2 = p_{th}$.

The quality of the approximation can be measured by the root mean square error of the approximation divided by the empirical mean value (variation coefficient), which is determined for each section of the relaxation dependence by the formula:

$$v_k = \frac{\sqrt{F_k(a_k)/(n-1)}}{\sum_{i=0}^{n-1} y_E^i/n_k} \quad (6)$$

4. To choose the optimal model, the condition of minimizing the corresponding root mean square error is applied, for example, the rule for the k -th kinetic dependence is as follows:

IF $v_{min} = \min(v_k)$, THEN the k -th model is selected.

To implement this algorithm, the well-known and widely used mathematical software package Mathcad [29] was chosen as the main tool. The program's user interface was developed using Visual Studio tools. Specifically, the monitor for the package was created using C# within a Windows Forms Application project type. As previously mentioned, the computational algorithm's application module consists primarily of Mathcad documents, specifically version 15, which are utilized for performing the necessary calculations and operations.

In addition, the application supports a range of universal tools that allow users to work with various file formats, including .xlsx (Excel spreadsheets) and .dat (text data files). The results of computations are stored in text files, and the content of these files is then displayed

on the screen in the appropriate form field. The results are added to the ListBox element for better organization and easier access by the user [30,31].

For easy navigation between different sections of the application, buttons (Button) are used, allowing the user to move seamlessly from one part of the program to another. The user interface is designed with the understanding that the application integrates different software products, which work together to provide a comprehensive solution. It includes various service functions to assist users with data processing and analysis. These functions and the overall system layout are clearly depicted in Figure 1.

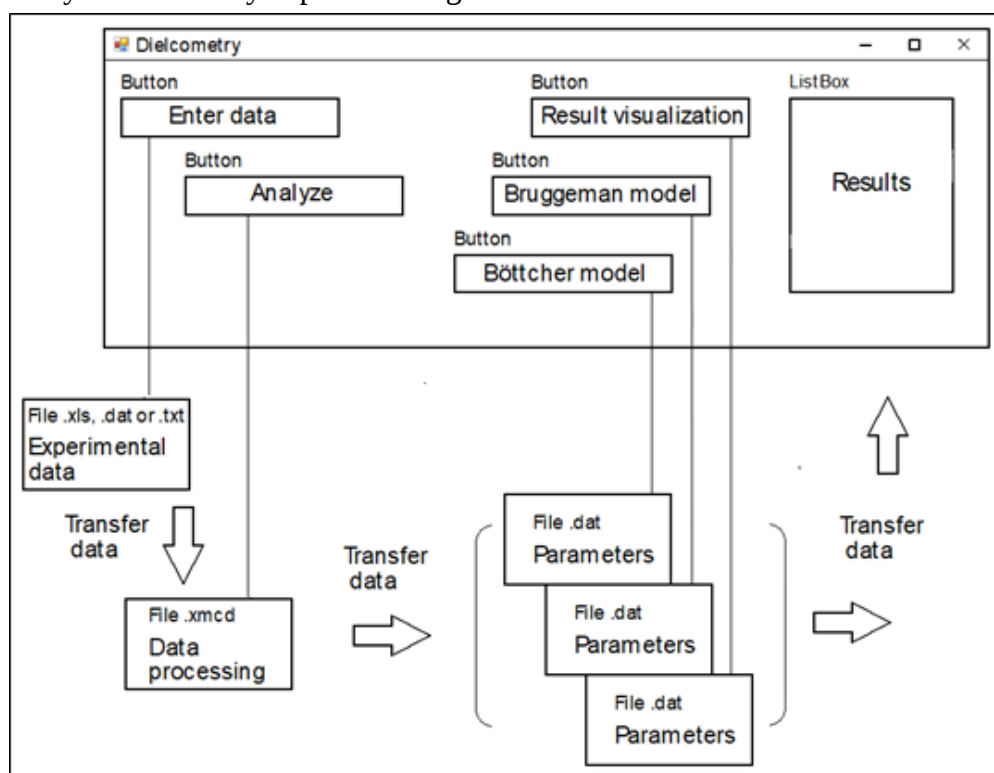


Figure 1 – Main user interface window and application operation diagram

The algorithm to interact with the user interface can be described by the following steps:

1. Data input. The operator uploads the corresponding table of experimental measurement data on the concentration dependence of static dielectric permeability into an Excel spreadsheet (transition to the data file window by clicking the "Enter date" button).

2. Calculation in the Mathcad software package of the model parameters for the specified dependence for a given factor value and transferring them to the result analysis text file (transition to the Mathcad software module window by clicking the "Analyze" button). Additionally, the conversion and transfer of output data to a separate text file is performed automatically.

3. Displaying the results in the ListBox field (clicking the "Result visualization" button).

Furthermore, the main window contains the buttons "Bruggeman model" and "Bottcher model," which allow, if necessary, to check the correctness of the entered data and review the obtained values of the model parameters and relative modeling errors, respectively.

Conclusions. A variant of the implementation of computer analysis of measurement data of the concentration dependence of dielectric permeability in two-component composites is presented, aimed at obtaining information about their structural features.

As a result of this processing, it is possible to obtain information about the structure model that best describes the electrical properties of the studied heterogeneous material, as well as determine the optimal parameters of the selected model (depolarization factor for particles of the component with higher electrical conductivity for the matrix system or percolation threshold for the statistical mixture).

The developed application can be considered as part of the software for an automated system for scientific research in the field of electronics of heterogeneous structures and materials and can also be used locally.

REFERENCES

1. Починок А. В., Лазурик В. Т., Целуйко Ф. Ф., Боргун Е. В. Компьютерная обработка результатов измерений характеристик плазменного источника ультрафиолета. Вісник Харківського національного університету. Серія фізична «Ядра, частинки, поля», 2008, № 859, с. 59–64.
2. Селиванова З. М., Стасенко К. С. Теоретические основы построения интеллектуальных информационно-измерительных систем допускового контроля теплопроводности теплоизоляционных материалов: монография. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015, 200 с.
3. Himanen L., Geurts A., Foster A. S., & Rinke P. Data-driven materials science: status, challenges, and perspectives. *Advanced Science*, 2019, V. 6, No. 21, P. 1900808.1–1900808.23.
4. Климентьев А. А. Методы обработки сверхбольших объемов данных в распределенной гетерогенной компьютерной среде для приложений в области физики высоких энергий и ядерной физики. *Физика элементарных частиц и атомного ядра*, 2020, Т. 51, Вып. 6, с. 1175–1303.
5. Tonkoshkur A. S., Lozovskyi A. S. Software for processing and analysis of experimental data in researching of gas sensors. *System Technologies*, 2022, 1(138), P. 175–184. DOI: 10.34185/1562-9945-1-138-2022-17.
6. Кулик І., Тонкошкур О. Додаток для обробки даних діелькометричних вимірювань. Тези доповідей VII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Перспективні напрямки сучасної електроніки, інформативних та комп'ютерних систем» (MEICS-2022), Дніпро, 2022, с. 58–59.
7. Gavrikov V. Samovosstanavlivayuschiesya PTC-predohraniteli dlya zaschiti ot tokovih peregruzok. *Novosti Elektroniki*, 2014, N. 12, P. 11–15.
8. Protecting rechargeable Li-ion and Li-polymer batteries [Electronic resource]: Littelfuse, Inc., 2017. Mode access: <http://www.littelfuse.com/...>
9. Tonkoshkur A. et al. Application of polymer posistor nanocomposites in systems for protecting photovoltaic components of solar arrays from electrical overloads. *International Science Group*, 2021.

10. Antonova K. V., Kolbunov V. R., Tonkoshkur A. S. Structure and properties of polymer composites based on vanadium dioxide. *Journal of Polymer Research*, 2014, V. 21, No. 5, P. 1–5.
11. Kolbunov V. R., Tonkoshkur A. S., Gomilko I. V. Electrical and dielectric properties of polymer composite based on vanadium dioxide. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, T. 28, P. 8322–8328.
12. Morozov I. A., Svistkov A. L., Heinrich G. B. Structure of the carbon-black-particles framework in filled elastomer materials. *Polym. Sci. Ser. A*, 2007, 49, P. 292. DOI: 10.1134/S0965545X07030091.
13. Montazeri A., Naghdabadi R. Investigation of the interphase effects on the mechanical behavior of carbon nanotube polymer composites by multiscale modeling. *J. Appl. Polym. Sci.*, 2010, 117, P. 361. DOI: 10.1002/app.31460.
14. Tonkoshkur A. S., Lyashkov A. Y., Degtyaryov A. V. Size effects in electrical properties of carbon-polypropylene composites. *Ukrainian Journal of Physics*, 2016, T. 61, No. 11, С. 1008–1008.
15. Духин С. С., Шилов В. Н. Диэлектрические явления и двойной слой в дисперсных системах и полиэлектролитах. Київ: Наукова думка, 1972, 226 с.
16. Фистуль В. И. Перколяция тока в полимеро-полупроводниковой структуре. *Физика и техника полупроводников*, 1993, Т. 27, Вып. 11/12, С. 1788–1794.
17. Degtyar'ov A. V., Tonkoshkur A. S., Lyashkov A. Y. Electrical Properties of Posistor Composite Materials Based on Polyethylene-Graphite. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, 2006, V. 2, No. 4, P. 435–441.
18. Bänhegyi G. Numerical analysis of complex dielectric mixture formulae. *Colloid & Polymer Science*, 1988, V. 266, P. 11–28.
19. Гречко Л.Г. Эффективная диэлектрическая проницаемость матричных дисперсных систем со сферическими металлическими включениями. *Поверхня*. 2009. Вип. 1. С. 266-270
20. Тонкошкур О. С., Ігнаткін В. У. Фізичні основи електричного контролю неоднорідних систем. Навчальний посібник з грифом МОН. Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2010. 290 с.
21. Degtyarlov A. V., Tonkoshkur A. S., Lyashkov A. Yu. Electrical Properties of Posistor Composite Materials Based on Polyethylene-Graphite. *Multidiscipline Modeling in Materials and Structures*, VSP, 2006, V. 2, No. 4, P. 435–441.
22. Харитонов Е. В. Диэлектрические материалы с неоднородной структурой. Москва: Радио и связь, 1983. 128 с.
23. Shklovskii B. I., Efros A. L. *Electronic Properties of Doped Semiconductors*. Springer-Verlag, Berlin, 1983.
24. Aneli J., Zaikov G., Mukbaniani O. *Physical Principles of the Conductivity of Electrical Conducting Polymer Composites*.

25. Shin S.-G., Kwon I.-K. Effect of Temperature on the Dielectric Properties of Carbon Black-Filled Polyethylene Matrix Composites Below the Percolation Threshold. *Electronic Materials Letters*, 2011, Vol. 7, No. 3, P. 249–254.
26. Kolbunov V. R., Tonkoshkur A. S., Gomilko I. V. Electrical and Dielectric Properties of Polymer Composite Based on Vanadium Dioxide. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, 28, P. 8322–8328.
27. Колбунов В. Р., Тонкошкур А. С., Антонова Є. В., Вашерук А. В. Діелектрическа спектроскопія композитів на основі поліпропілена і діоксида ванадія в радіочастотному діапазоні. *Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького ун-ту економіки, інформаційних технологій і управління*, 2014, № 3-4 (45-46), С. 21–28.
28. Шуп Е. Т. Решение инженерных задач на ЭВМ. Москва: Мир, 1982. 230с.
29. Макаров Е. Г. Инженерные расчеты в Mathcad 15. Москва, 2011. 400 с. <https://ru.djvu.online/file/Qei0sgnsq4irc>.
30. Программирование в Windows Forms: [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://metanit.com/sharp/windowsforms>.
31. Use Visual C# to do basic file I/O. Microsoft Learn. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://learn.microsoft.com/en-us/troubleshoot/developer/visualstudio/csharp/language-compilers/file-io-operation>

Received 31.01.2025.
Accepted 03.03.2025.

Додаток для обробки та аналізу даних вимірювань концентраційної залежності діелектричної проникності двокомпонентних композитів

У статті розглядається розробка та впровадження обчислювального застосування, призначеного для обробки та аналізу даних, отриманих з діелектричних досліджень. Ці дослідження зосереджені на загальному аналізі типу структури двокомпонентних композитних матеріалів та гетерогенних діелектриків. Запропонований алгоритм використовує експериментальні концентраційні залежності статичної діелектричної проникності для класифікації структури композитів як матричних систем або статистичних сумішей на основі встановлених теоретичних моделей.

Використовуються модель Бругемана-Ханаї для матричних систем та модель Ботчера-Хсу для статистичних сумішей для оцінки діелектричної поведінки гетерогенних систем, що містять провідникові включення. Шляхом апроксимації експериментальних даних за допомогою цих моделей інструмент визначає ключові параметри, такі як фактори деполяризації або порогові значення перколяції, які є критичними для розуміння властивостей таких матеріалів.

Розроблено з використанням Mathcad для алгоритмічної реалізації та Visual Studio – для проектування інтерфейсу, програмне забезпечення обробляє експериментальні дані з вхідних файлів (формати Excel або текстові файли) та генерує результати у зручному для користувача форматі. Основні функціональні можливості включають перевірку введених даних, обчислення параметрів моделі та візуалізацію результатів. Цей підхід значно підвищує ефективність і точність діелектричного аналізу порівняно з ручними обчисленнями.

Розроблений застосунок має автономні можливості та потенціал для інтеграції в автоматизовані науково-дослідницькі системи для електроніки та науки про матеріали. Це дозволяє дослідникам спрощувати складні математичні обчислення, одночасно забезпечуючи надійний вибір моделей на основі мінімальних помилок апроксимації.

Ключові слова: автоматизація діелектричних досліджень, обробка даних, гетерогенні діелектрики, додаток, Mathcad програма, дизайн інтерфейсу.

Тонкошкур Олександр Сергійович – д-р фіз.-мат. наук, професор, професор кафедри електронних обчислювальних машин, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Щербак Андрій Євгенійович – аспірант кафедри електронних обчислювальних машин, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

Tonkoshkur Alexander Sergeevich – doctor of physical and mathematical sciences, professor, professor of the Department of Electronic Computing Machines, Oles Honchar Dnipro National University.

Shcherbak Andrii Yevheniiiovych – PhD student of the Department of Electronic Computing Machines, Oles Honchar Dnipro National University.

ANALYSIS OF DEPLOYING INDUCTANCE-TO-PULSE SEQUENCE CONVERTER ON NE555 INTEGRATED TIMER

Annotation. The peculiarities of construction of inductive impedance converter Based on integral timer are analysed. Conditions of linear transformation of inductive impedance into a sequence of rectangular pulses are found.

Keywords: integral timer, pulse, inductance, impedance, deployment converter.

Introduction. The task of increasing the reliability of measurement and control devices, which to a great extent depends on the number of constituent elements and simplicity of circuit realisation, is topical. Promising for the construction of simple and reliable converters is an integrated single-cycle analogue timer NE555 (and its analogues), used to convert the capacitance and resistance of an electrical circuit into a controlled sequence of rectangular pulses [1,2]. However, there is practically no sufficient information about the use of the integrated timer as an inductance converter. This requires an analysis of the peculiarities of the construction of inductive impedance converters on the integral timer.

Problem statement. The purpose of the work is to determine the conditions for the construction of an inductance converter into a sequence of rectangular pulses on the basis of an integral timer.

The main part. In analogue timers, the excitation signal is fed to the input of an internal dual-threshold comparator, which allows the design of deployment-type converters with a linear or exponential deployment function. One of the possible simple realisations of the inductance converter in the period of rectangular pulses is shown in Fig. 1. Here L is the inductance to be converted with its own active resistance r . The inductance L and the timing resistor R form an integrating circuit, the input of which is connected to the timer output, and the output to the input of an internal two-threshold comparator with switching voltages $U/3$ and $2U/3$, where U is the output voltage of the timer. When the timer is switched on, a high level of voltage U is set at its output, equal to the supply voltage E_n , which is distributed to the elements of the integrating circuit according to the equation

$$L \frac{di}{dt} + (R + r)i = U, \quad (1)$$

Where $i(t)$ is the current flowing from the timer output through the elements of the integrating circuit. The solution of the differential equation (1) at zero initial conditions determines the instantaneous value of current $i(t)$ in the form of

$$i(t) = I[1 - \exp(-\frac{t(R+r)}{L})], \quad (2)$$

where $I = U/(R+r)$. The current $i(t)$ creates a voltage drop on the resistance R , which is the deploying voltage of the converter

$$u(t) = \frac{UR}{R+r} [1 - \exp(-\frac{t}{\tau})], \quad (3)$$

where $\tau = L/(R+r)$ is the time constant of the integrating circuit. According to (3), the voltage $u(t)$ increases exponentially and at time t_1 reaches the level of the lower triggering threshold $U/3$, for which

$$u(t_1) = \frac{U}{3} = \frac{UR}{R+r} [1 - \exp(-\frac{t_1}{\tau})], \quad (4)$$

As time passes, the deployment voltage continues to increase and at the next time instant t_2 reaches the level of the upper triggering threshold $2U/3$, for which

$$u(t_2) = \frac{2U}{3} = \frac{UR}{R+r} [1 - \exp(-\frac{t_2}{\tau})], \quad (5)$$

after which the output voltage U of the timer jumps to zero. This leads to a change in the current direction $i(t)$ as well as a change in the deployment direction until the next switchover at $u(t) = U/3$. The time moments t_1 and t_2 at which the timer switches can be found by solving equations (4) and (5), whereby

$$t_1 = \tau \ln \frac{3R}{2R-r}, \quad t_2 = \tau \ln \frac{3R}{R-2r}.$$

The duration of the generated output pulse is $t_2 - t_1$ and their period $T = 2(t_2 - t_1)$, hence

$$T = \frac{2L}{R+r} \ln \frac{2R-r}{R-2r}. \quad (6)$$

The obtained conversion characteristic (6) has the form $T = kL$, where

$$k = \frac{2}{R+r} \ln \frac{2R-r}{R-2r}$$

is the conversion coefficient of inductance L during the period T

of rectangular pulses.

It follows from (6) that the conversion of inductance L occurs according to the linear law; the conversion factor k is determined by the absolute values of the resistance of the integrating circuit R and the own active resistance r of the inductance, as well as their ratio R/r , and the conversion factor k will be a positive number only if the condition is fulfilled

$$R > 2r. \quad (7)$$

Obviously, at $R < 2r$ values of k do not exist; at $R = 2r$ conversion factor $k = \infty$, which means infinite period T , otherwise, oscillation failure. When $R \gg 2r$, the expression of the conversion coefficient is simplified and transformed to the form $k \approx 2 \ln 2 / R$. The value of the conversion coefficient k can be controlled by the value of resistance R , and, in order to obtain

high values of k , the ratio of resistance R/r should be as close as possible to the value 2, taking into account the condition (7), while the absolute values of R and r should be minimal.

Experimental verification of expressions (6) and (7) is carried out in the converter circuit (Fig. 1), assembled on the NE555 integrated timer. Fig. 2 shows the experimental dependences of the duration T of the period of rectangular pulses from the output of the timer on the value of the transformed inductance L at different conversion factors k . The dependences confirm the linear character of inductance conversion in a wide enough range and the validity of expression (6). At the same time, the deviation of experimental data from the calculated data according to expression (6) does not exceed 10%.

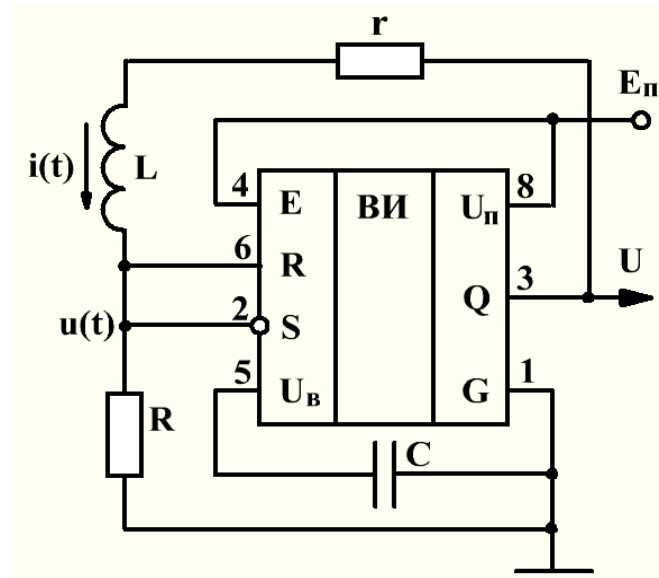


Figure 1- Converter of inductance L into a sequence of rectangular pulses

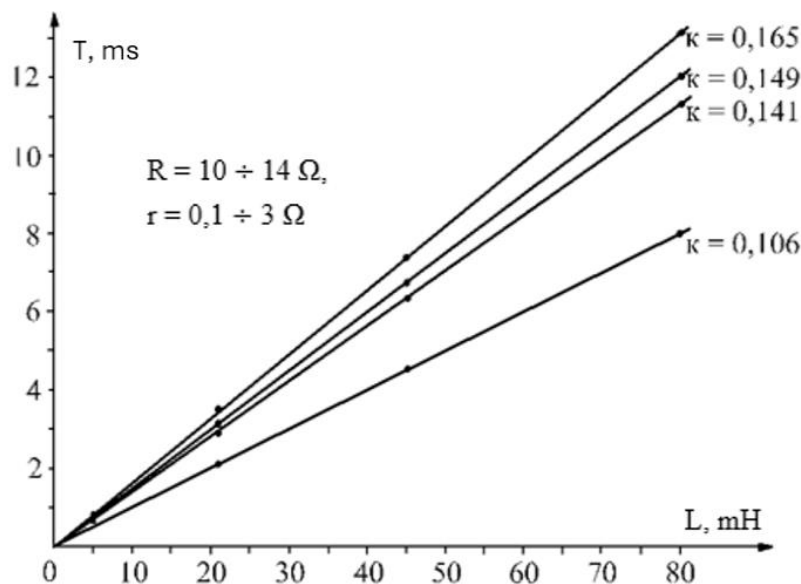


Figure 2 - Conversion characteristics of inductance L at different conversion factors k

Fig. 3 shows the experimental dependences of the conversion coefficient on the logarithm of the resistance ratio R/r . It can be seen that the closer $\lg(R/r)$ to 0,301 (otherwise, R/r to 2), the more oscillations in the circuit were absent, which confirms the validity of condition (7). To transform the grounded inductance L (Fig. 4), the circuit should be supplemented with an inverting amplifier with a single gain ($R_1 = R_2$) and bias circuit $R_4 < 0.5R_3$. In this case, a sweeping voltage similar to expression (3) will be formed at the amplifier output.

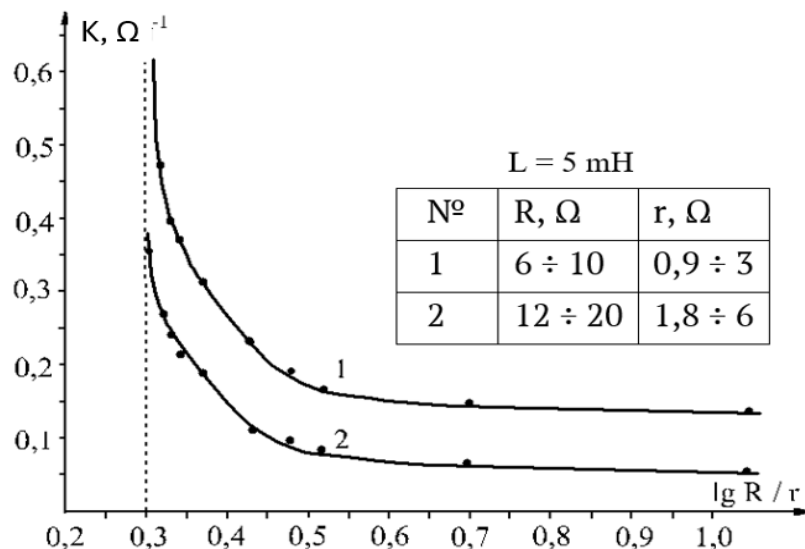


Figure 3 - Dependences of conversion coefficient k on the ratio of resistances R/r at their different absolute values

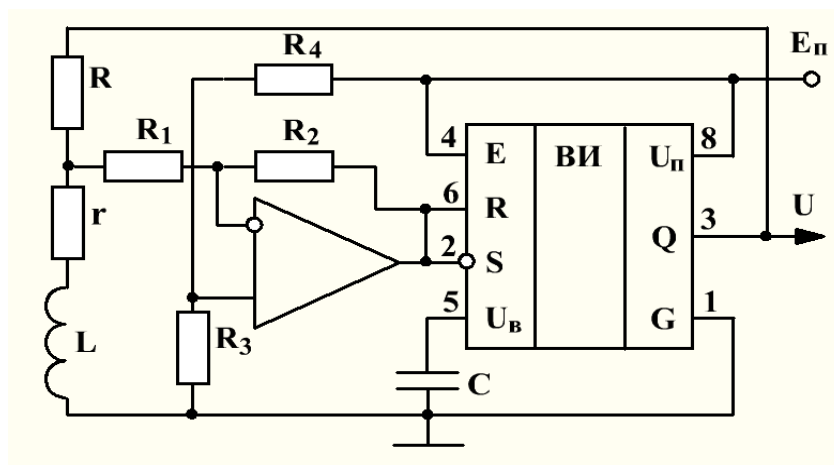


Figure 4 - Inverter with grounded inductance L

Conclusions. As a result of the analysis the following has been established:

- the converter based on a single-cycle analogue timer converts the inductance into a period of rectangular pulses following a linear law in a wide enough range with a conversion coefficient inversely proportional to the sum of active resistances of the integrating circuit;
- to ensure oscillations, the time-dependent resistance of the integrating circuit must always be greater than twice the active resistance of the inductance to be converted;

c) the inductance converter on the timer is characterised by good functional capabilities with extremely simple circuit implementation, which implies its sufficiently high reliability in the construction of converters of passive parameters of electrical circuits into a controlled sequence of pulses.

ЛІТЕРАТУРА

1. Теория и практика применения таймера 555: веб-сайт.
URL: <http://www.cxem.net/beginner/beginner50.php> (дата звернення: 29.09.2024).
2. Коломбет Е.А. Микроэлектронные средства обработки аналоговых сигналов. М.: Радио и связь, 1991. 376 с.

REFERENCES

1. Teorija i praktika primenenija taimera 555: web-sait.
URL <http://www.cxem.net/beginner/beginner50.php> (data zvernennja: 29.09.2024).
2. Kolombet E.A. Mikroelektronnie sredstva obrabotki analogovikh signalov. M.: Radio i svi-jaz, 1991. 376 s.

Received 04.02.2025.

Accepted 06.02.2025.

Аналіз розгортуючого перетворювача індуктивності в послідовність імпульсів на інтегральному таймері NE555

Про використання інтегрального таймера NE555 як перетворювача індуктивності в послідовність прямокутних імпульсів відомості практично відсутні. Це вимагає проведення аналізу особливостей побудови на інтегральному таймері перетворювачів індуктивного імпедансу. Досліджено схему таймера з інтегруючим колом у вигляді індуктивності, що перетворюється, і опору, під'єднаних до входу двопорогового компаратора таймера. Для такого кола складено диференціальне рівняння, розв'язування якого дало змогу визначити експоненціальний характер розгортальної напруги на входах компараторів таймера, а також одержати вираз характеристики перетворення у вигляді залежності періоду слідування вихідних прямокутних імпульсів від величини індуктивності, яку перетворюють. Встановлено, що коефіцієнт перетворення визначається величинами опору часозадавального кола і власним активним опором індуктивності, що перетворюється, при цьому для існування коливань опір часозадавального кола має бути більшим за подвоєний активний опір індуктивності. Експериментально підтверджено лінійність характеристики перетворення і обернено пропорційний вид зв'язку коефіцієнта перетворення з відношенням активних опорів часозадавального кола та індуктивності.

Твердоступ Микола Іванович – доцент, к.т.н., доцент кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Tverdostup Mykola Ivanovych – Associate Professor of Computer Systems Engineering Department of the Oles Honchar Dnipro National University.

DEVELOPMENT OF A WEB APPLICATION FOR PROVIDING SERVICES THROUGH NFT OWNERSHIP

Abstract. A solution for creating a web application for providing subscription-based services using NFT technology is presented. The ERC721 standard for smart contracts of the Ethereum blockchain is used to create NFT. A three-tier architecture of the application is used, which includes a client interface, a server, and a blockchain layer. The features of smart contract integration are considered, which ensures uniqueness, transparency, and security of operation. The main functions include private and public token sales, subscription renewal, and user access to services.

Keywords: NFT, ERC721, token, smart contract, blockchain, Ethereum, Web3.js, OpenZeppelin, MetaMask.

Formulation of the problem. In the modern world, non-fungible tokens (NFTs) have gained popularity due to the ability to digitally prove ownership of unique objects. These tokens are used in various industries: art, games, digital collections and even to prove ownership of real-world objects. At the same time, the emergence of NFTs has opened up new opportunities for creating interactive web applications based on the use of tokens as access to services or privileges. However, the integration of NFTs into web applications requires addressing issues of security, transaction transparency, ensuring compliance with blockchain standards and effective interaction between the user and smart contracts.

Purpose of the research. It is necessary to consider the possibilities of creating a web application using NFTs to provide services in the form of a monthly subscription. The application should have the ability to initially sell tokens through public and private stages, extend the monthly subscription tied to the NFT, and gain access to services.

Such services can be: educational courses, video/audio collections, access to software, etc.

Main part. A non-fungible token is a unique digital asset that proves ownership of a specific object or content in the digital world. Unlike cryptocurrencies such as Bitcoin or Ether, which are fungible (one Bitcoin equals another Bitcoin), each NFT has unique properties that make it unique.

These tokens are created and stored on a blockchain, most often on the Ethereum platform, although other blockchains are also possible.

Each NFT has a unique identifier and metadata that defines its uniqueness. This data guarantees the authenticity and ownership history of the token. For example, when an artist

creates digital art and converts it into an NFT, this token confirms that a specific digital copy is original and belongs to a specific person.

Using NFTs in applications has several important advantages.

First, NFTs provide uniqueness of digital assets, which is critical for proving ownership and authenticity. This is especially true for digital works of art, collectibles, and other unique assets. Second, NFTs allow users to have full control over their digital assets, which makes it easier to transfer, sell, or exchange them without the need for intermediaries. This opens up new opportunities for monetizing digital services and content.

In addition, NFTs can be integrated with smart contracts to automate various processes, such as paying royalties to authors when their works are resold. Transparency and trust in the system are ensured by the fact that all transactions with NFTs are stored on the blockchain [1].

One of the key features of the Ethereum blockchain is the ability to create and manage both fungible and non-fungible tokens. Several standards have been developed to ensure the compatibility and interoperability of these tokens, including ERC20 and ERC721. ERC20 is the standard for creating fungible tokens, while ERC721 is the standard for creating non-fungible tokens.

The main functions that ERC721 adds to a smart contract are:

- balanceOf - returns the number of tokens owned by a given recipient;
- ownerOf - returns the owner of a given token;
- transferFrom - allows you to transfer a token from one owner to another;
- safeTransferFrom - transfers a given NFT from one account to another;
- approve - allows the token owner to grant another recipient permission to manage the token;
- getApproved - returns the address that has been granted permission to manage a given token;
- setApprovalForAll - allows or revokes permission for another recipient to manage all of the owner's tokens;
- isApprovedForAll - checks whether the recipient has been given permission to manage all of the owner's tokens [2].

The web application being created has a three-tier architecture: client layer, server layer, and blockchain layer.

At the blockchain level, the developed smart contract on the Ethereum platform uses the ERC721 standard to create an NFT with the name NewsToken and the symbol NTK. The necessary modules are imported from the OpenZeppelin library: ERC721 - the NFT standard, ERC721Burnable - provides the ability to modify the number of NFTs, and Ownable - is responsible for the ability to own and own rights to NFTs [3].

Variables are defined that are responsible for the settings and current state of the contract: the current and maximum number of NFTs, the purchase and subscription price, variables for starting the sale, blocking subscriptions, and transferring tokens, as well as hash tables with wallet addresses for private token sales whitelistedAddresses and the validity periods of the current subscription for each token.

The constructor calls the ERC721 constructor, where the token name and symbol are specified, and the smart contract owner is passed to the Ownable constructor.

The noContractExec modifier is defined to prevent massive initial sale to speculators through other smart contracts.

Taking into account the specifics of the initial sale in the form of a private and public round, the corresponding minting functions whitelistMint() and publicMint() have been developed. The public stage gives access to purchase NFT to anyone, and during the private sale, only users whose addresses are listed in the whitelistedAddresses hash table have the right to purchase. Checks are provided for the correct amount to be paid, the presence of the buyer in the private sale list, etc. The subscription renewal function renewToken(uint tokenId) accepts the NFT token identifier as a parameter. Provided that this token is owned, the subscription is extended for 30 calendar days, which generates a tokenRenew event.

```
function renewToken(uint tokenId) public payable noContractExec
{
    require(msg.value == renewalPrice, "Incorrect amount of ether
sent.");
    require(_exists(tokenId), "Token does not exist.");
    require(renewalsEnabled, "Renewals are currently disabled");

    uint256 _currentexpiryTime = expiryTime[tokenId];

    if (block.timestamp > _currentexpiryTime) {
        expiryTime[tokenId] = block.timestamp + 30 days;
    } else {
        expiryTime[tokenId] += 30 days;
    }
    emit tokenRenew(tokenId, expiryTime[tokenId]);
}
```

The smart contract also defines functions for solving various administrative tasks: minting and subscribing a token to another user at the administrator's expense, changing the price for the token and subscription, adding and removing an address from the list for private sale, setters of control variables and outputting the balance from the smart contract. We have functions for viewing variables (getters) and transferring tokens to another user.

The site consists of the main page and pages for authorization, NFT sale and description. Integration with the Ethereum blockchain smart contract is performed through the web3.js library. It provides developers with the ability to easily connect to the network, send transactions, interact with smart contracts and receive information from the blockchain.

The authorization page checks for the Metamask extension, prompts you to sign a request to own this wallet, and if everything is successful, the main page of the website opens.

If the user has an NFT, the main page displays the user's address, the token identifier he owns, the date and time of the expiration of the last purchased subscription. The user has the

opportunity to receive services in the form of information files: the subscription is checked for relevance, all available files are collected and downloaded to the user.

To renew a subscription to services, the `renewSub()` function is executed, which receives the renewal price and a token for a request to the smart contract, namely to the `renewToken(uint tokenId)` function. If the subscription is successfully renewed, 30 days are added to the expiration date. The NFT sale page displays two stages of purchase: private and public, the status of these stages (active or inactive), the user's access to the active stage, the maximum and current number of NFTs purchased. When the user chooses to purchase an NFT, the `mintNFT()` function is executed, which receives the purchase price, checks whether there are still free tokens for sale, rechecks the relevance of the stages, selects the active one and accordingly sends a request to the `whitelistMint()` or `publicMint()` functions of the smart contract.

The server part based on Node.js allows you to process many requests simultaneously, making the system more scalable and productive.

Conclusions. The proposed web application demonstrates the practical implementation of using NFTs to manage subscriptions to information services. Such a system provides users with significant benefits. NFTs provide ownership, and the absence of a password database eliminates the risks of hacking the server. Payment with cryptocurrency allows you to be financially independent, and the transparency of the blockchain eliminates the possibility of data forgery. The anonymity of wallets guarantees the protection of personal information, ensuring confidentiality and security.

REFERENCES

1. Imran Bashir. Mastering Blockchain: Inner workings of blockchain, from cryptography and decentralized identities, to DeFi, NFTs and Web3, Fourth Edition. – Packt Publishing, 2023. – 818 p.
2. ERC-721: Non-Fungible Token Standard. [Electronic resource]. Access mode <https://eips.ethereum.org/EIPS/eip-721>.
3. ERC721. [Electronic resource]. Access mode <https://docs.openzeppelin.com/contracts/3.x/erc721>.

Received 04.02.2025.

Accepted 06.02.2025.

Розробка веб-додатку з надання послуг через володіння NFT

Невзаємозамінні токени (NFT) набули популярності завдяки можливості цифрового підтвердження права власності на унікальні об'єкти. Поява NFT відкрила нові можливості для створення інтерактивних веб-додатків, що базуються на використанні токенів як доступу до різноманітних послуг чи привілеїв. Інтеграція NFT у веб-додатки вимагає вирішення питань безпеки, прозорості транзакцій, забезпечення відповідності стандартам блокчейна та ефективної взаємодії між користувачем і смарт-контрактами.

Представлено рішення для створення веб-додатку з використанням NFT для надання послуг в вигляді щомісячної підписки. Такими послугами можуть бути: навчальні курси, відео/аудіо збірки, доступ до програмного забезпечення тощо.

Створюваний веб-додаток має трирівневу архітектуру: клієнтський та серверний рівні та рівень блокчейну.

На рівні блокчейну розроблений смарт-контракт на платформі Ethereum використовує стандарт ERC721 для створення і управління NFT. Передбачено функції для карбування токенів, продовження підписок, управління цінами та статусом продажу.

Інтеграція сайту з смарт-контрактом виконується через бібліотеку web3.js. Вона надає розробникам можливість легко підключатися до мережі, відправляти транзакції, взаємодіяти зі смарт-контрактами та отримувати інформацію з блокчейну.

Реалізовано сторінки авторизації, продажу NFT, управління підписками та доступу до послуг. Користувачі мають можливість підписуватися на послуги, переглядати активні підписки, а також здійснювати купівлю та передачу NFT.

Серверна частина веб-додатку на базі Node.js дозволяє обробляти багато запитів одночасно, роблячи систему більш масштабованою та продуктивною.

Основні переваги системи включають унікальність цифрових активів, фінансову незалежність завдяки використанню криптовалют, а також захист персональних даних завдяки анонімності гаманців. Використання технологій блокчейну забезпечує високий рівень безпеки, виключаючи ризики підробок даних та забезпечуючи безпечний доступ до інформації.

Пономарьов Ігор Володимирович - кандидат технічних наук, доцент кафедри електронних обчислювальних машин факультету фізики, електроніки та комп'ютерних систем Дніпровського національного університету ім.О.Гончара.

Ponomarev Igor Volodimirovich - candidate of technical sciences, associate professor of the department of electronic computers of the faculty of physics electronics and computer systems of the Oles Honchar Dnipro National University.

В.В. Спірінцев, О.В. Спірінцева, О.С. Генчук

ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТЕЙ ПЛАТФОРМИ NODE.JS ПРИ РОЗРОБЦІ ПРОКСІ-СЕРВЕРІВ З УРАХУВАННЯМ СУЧАСНИХ ВИМОГ ДО ПРОДУКТИВНОСТІ ТА СТАБІЛЬНОСТІ

Анотація. В роботі досліджено можливості платформи Node.js до розробки проксі-сервера з використанням асинхронного підходу, описано процес створення власної реалізації проксі-сервера, включаючи архітектурні рішення та використані модулі. Здійснено тестування продуктивності в програмі FOGLDN Proxy Tester запропонованого рішення, результати якого порівняно із показниками інших популярних реалізацій Squid Proxy та Tinyproxy. На основі отриманих даних виконано аналіз ефективності запропонованого проксі-сервера. Для реалізації програмного пакету було використано мову програмування JavaScript, платформу Node.js, базу даних SQLite, ORM Sequelize, менеджер процесів PM2, бібліотеку React.

Ключові слова: проксі-сервер, JavaScript, Node.js, React, Squid Proxy, Tinyproxy .

Постановка проблеми. Проксі-сервери відіграють ключову роль у сучасних інформаційних системах, забезпечуючи ефективну, безпечну та масштабовану роботу мереж. Їх використання дозволяє оптимізувати трафік, підвищити продуктивність, забезпечити конфіденційність та стабільність у різноманітних середовищах – від корпоративних мереж до персональних користувачів. У сфері розробки проксі-серверів асинхронні платформи набули значної популярності та важливості. Вони дозволяють суттєво підвищити продуктивність, покращити масштабованість і забезпечити плавне обслуговування великої кількості одночасних з'єднань. Особливості використання асинхронних платформ можна простежити на прикладі технологій на зразок Node.js, які активно впроваджуються для реалізації проксі-серверів і суміжних мережевих рішень. Особливості використання асинхронних платформ у сфері розробки проксі-серверів полягають у неблокуючому підході до обробки трафіку [1], можливості ефективної обробки великої кількості одночасних запитів, підвищенні масштабованості та спрощенні архітектури. Це створює основу для розробки більш продуктивних, стабільних і масштабованих проксі-рішень, здатних успішно функціонувати в умовах сучасних динамічних інформаційних систем.

Аналіз останніх досліджень. Завдяки стрімкому розвитку технологій і підвищеним вимогам до продуктивності, сучасні підходи до розробки проксі-серверів акцентують увагу на масштабованості, швидкості роботи, надійності та підтримці новітніх мережевих протоколів [2]. Основні поточні тенденції:

– Використання асинхронних і подієво-орієнтованих архітектур. Один із ключових трендів у розробці проксі-серверів – перехід від традиційних блокуючих моделей обробки запитів до асинхронних, подієво-орієнтованих архітектур. Такі платформи, як Node.js, забезпечують неблокуючий ввід/вивід, що дозволяє обробляти тисячі одночасних з'єднань без суттєвого збільшення затримки [3], що не лише підвищує продуктивність, а й дає змогу ефективно масштабувати систему горизонтально.

– Мікросервісна архітектура. Сучасні підходи до розробки часто передбачають використання мікросервісної архітектури, де проксі-сервер виступає як один зі спеціалізованих сервісів або складових більшого комплексу. Завдяки поділу системи на невеликі, незалежні компоненти, кожен мікросервіс може бути оновлений, масштабований або замінений без впливу на всю систему. Ця гнучкість дозволяє швидко реагувати на зміни в навантаженні та запитах користувачів.

– Контейнеризація. Контейнеризація, наприклад за допомогою Docker, також стала стандартним інструментом для розгортання проксі-сервера. Контейнери дозволяють створювати відтворювані оточення розробки та швидко розгортати їх у будь-якій інфраструктурі – локально, у хмарі чи гібридних середовищах. Це спрощує процес оновлення, масштабування та підтримки рішень.

– Інтеграція з системами оркестрації та балансування навантаження. Сучасні проксі-сервісні рішення часто працюють у зв'язці з оркестраторами контейнерів на кшталт Kubernetes [4]. Оркестрація дозволяє автоматизувати процеси розгортання, масштабування та оновлення системи. Проксі-сервери інтегруються з сервісами балансування навантаження, які забезпечують ефективний розподіл трафіку між різними вузлами. Це сприяє підвищенню доступності та стійкості до збоїв.

– Оптимізація продуктивності за допомогою кешування та CDN. Інтеграція зі системами кешування допомагає суттєво скоротити час доступу до часто запитуваних ресурсів. Сучасні проксі-сервери можуть динамічно кешувати відповіді, що знижує навантаження на кінцеві сервери та прискорює доставку контенту кінцевому користувачу. Поєднання проксі-сервера з CDN розширює можливості оптимізації, дозволяючи обслуговувати користувачів із географічно близьких вузлів мережі.

– Підвищення безпеки та контроль доступу. Безпека є критично важливою складовою сучасних систем, і проксі-сервери відіграють тут провідну роль. Інтегровані механізми аутентифікації, авторизації, шифрування HTTPS-трафіку, а також захист від DDoS-атак дозволяють забезпечити надійну й безпечну роботу системи. Сучасні підходи включають використання протоколів OAuth, JWT-токенів та інших сучасних стандартів безпеки [5].

– Аналітика, моніторинг і спостережуваність. Сучасні підходи включають впровадження систем моніторингу, логування та трасування запитів. Це забезпечує спостережуваність і доступ до актуальних метрик у режимі реального часу, що допомагає оперативно реагувати на аномалії, оптимізувати продуктивність і покращувати стабільність проксі-сервера.

Мета роботи. Полягає у створенні універсального програмного пакету для побудови проксі-серверів з використанням асинхронного підходу і впровадженню незалежних підслужб на базі платформи Node.js, що забезпечує урахування сучасних вимог до продуктивності та стабільності.

Основна частина. Розроблений програмний пакет складається з чотирьох основних складових: головної служби, інтерфейсу налаштування, бази даних і множини генерованих підслужб для конкретних IP-адрес. Діаграма взаємодії компонентів наведена на рисунку 1.

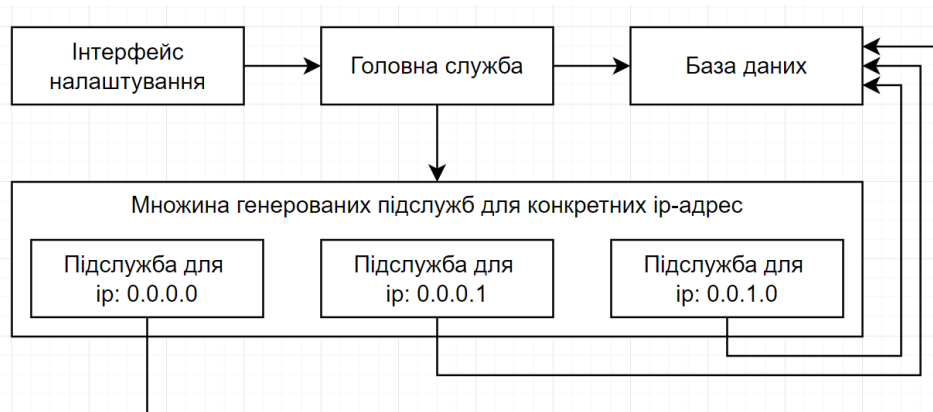


Рисунок 1 - Діаграма взаємодії компонентів програмного пакету

Головна служба відповідає за налаштування програмного пакету та виконує функції управління сутностями ip, user, auth та access, а також автоматично створює підслужби на основі екземплярів сутності ip. Це забезпечує централізоване управління всіма елементами системи. Структура головної служби розроблена для спрощення управління кодом та забезпечення модульності [6]. Вона включає наступні компоненти:

- файл app.js - основна вхідна точка служби, яка відповідає за запуск програми, підключення до бази даних, налаштування серверу та підключення маршрутизаторів;
- файли типу model - містять визначення моделей бази даних, таких як ip, user, auth та access. Вони відповідають за структуру таблиць у базі даних, а також за встановлення взаємозв'язків між ними;
- файли типу router - відповідають за маршрутизацію запитів. Кожна сутність має свій маршрутизатор, який визначає кінцеві точки для обробки CRUD-запитів та інших специфічних операцій, наприклад, маршрутизатор для сутності ip включає маршрути для активації, деактивації та отримання списку підслужб;
- файли типу controller - містять логіку обробки запитів, переданих маршрутизаторами. Контролери отримують дані з HTTP-запитів, взаємодіють із моделями бази даних, виконують необхідні операції та повертають відповідь клієнту. Для кожної сутності існує відповідний контролер.

Інтерфейс налаштування - це надбудова над API головної служби, для більш комфортної взаємодії. Це може бути CLI або сайт, що запускається разом з програмним пакетом. CLI працює постійно, повністю дублює можливості API і дозволяє вмикати і вимикати сайт. Сайт запускається на порту 13000, доступ до нього можна отримати че-

рез веб-браузер за адресою `http://host:13000`, де `host` це основна IP-адреса сервера де запущений програмний пакет. Окрім дублювання можливостей API сайт дозволяє масове завантаження нових IP-адрес і користувачів.

В базі даних (рисунок 2) зберігаються налаштування IP-адрес, дані користувачів, інформація про доступ користувачів до IP, а також записи логування. В якості бази даних було вибрано SQLite завдяки її простоті, легкості інтеграції та високій продуктивності в умовах невеликих і середніх проєктів. Розробка бази даних включала створення чотирьох таблиць: `ip`, `user`, `auth` і `access`, які зберігають всі необхідні дані для роботи програмного пакета. За допомогою ORM Sequelize забезпечено зручну інтеграцію бази даних із програмним кодом, автоматизацію створення таблиць та взаємозв'язків між ними. Це спрощує управління даними та забезпечує легкість у подальшій підтримці та розширенні функціональності.

Множина генерованих підслужб включає в себе по службі на кожному додану в програмний пакет IP-адресу. Для генерування підслужб був розроблений шаблон на основі бібліотеки `Handlebars`, який дозволяє створювати динамічні файли для кожної IP-адреси. Підслужби виконують функцію проксування, перевіряють авторизацію, логують запити та періодично синхронізують дані авторизації з головною службою.

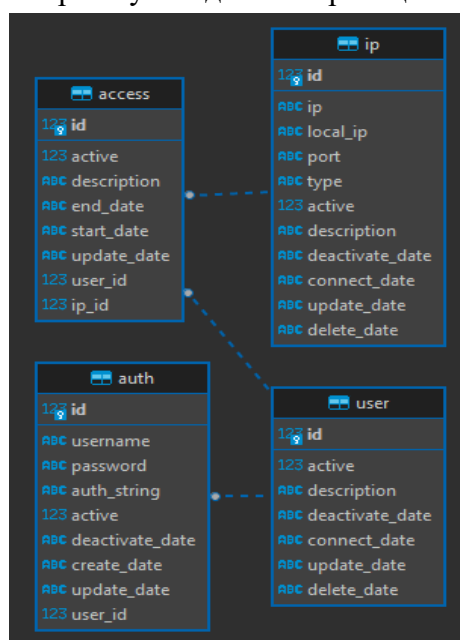


Рисунок 2 - Структура бази даних

Для підвищення швидкодії дані авторизації зберігаються в пам'яті підслужби, а не витягуються кожного разу з бази даних, для цього в підслужбі реалізована обробка запиту за фіксованою адресою із фіксованими даними авторизації. Завдяки використанню модулів `http`, `net` та `url` вдалося реалізувати високопродуктивний і надійний механізм обробки клієнтських запитів.

Для управління процесами програмного пакета використовується менеджер процесів PM2 - потужний інструмент для запуску, моніторингу та управління Node.js дода-

тками в реальному часі, що гарантує ефективне управління підслужбами, стабільну роботу та зручність у масштабуванні.

Розгортання програмного пакета включало налаштування виділеного серверу: встановлення Node.js, PM2 для управління процесами, Nginx для веб-інтерфейсу та маршрутизацію мережевих пакетів. Пакет легко інтегрується в інфраструктуру, забезпечуючи стабільну роботу.

На рисунках 3-6 наведено приклади взаємодії з головною службою через RESTful API. Для підвищення зручності користування в програмний пакет було включено web-інтерфейс розроблений за допомогою JavaScript-бібліотеки React.

Web-інтерфейс надає доступ до повної функціональності основного API та включає 3 сторінки: /ip, /user і /access. Базовою сторінкою є /ip, де перелічені екземпляри сутності ip. Кожен екземпляр можна видалити, редагувати, активувати або деактивувати (рисунок 7). Для навігації по web-інтерфейсу використовується навігаційна панель.

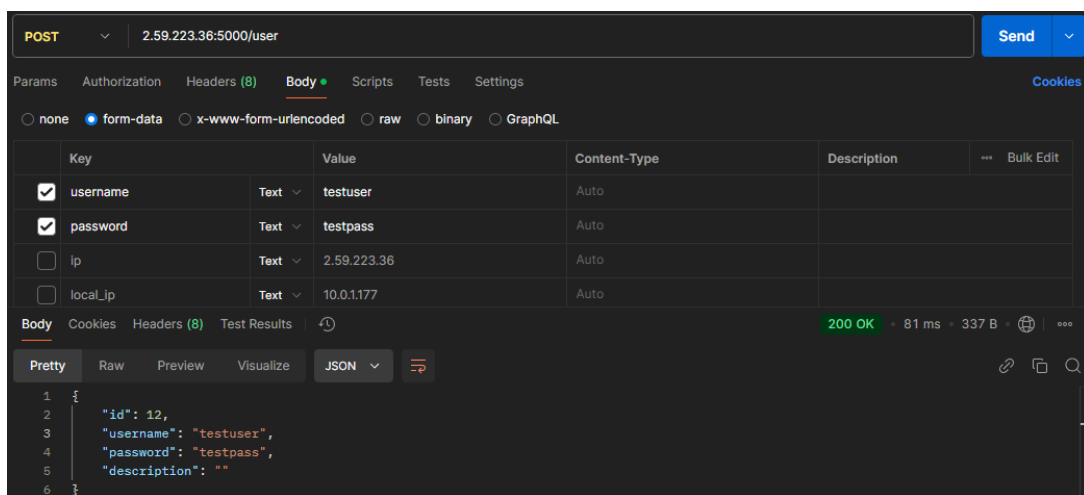


Рисунок 3 - Успішний запит на створення екземпляру сутності user

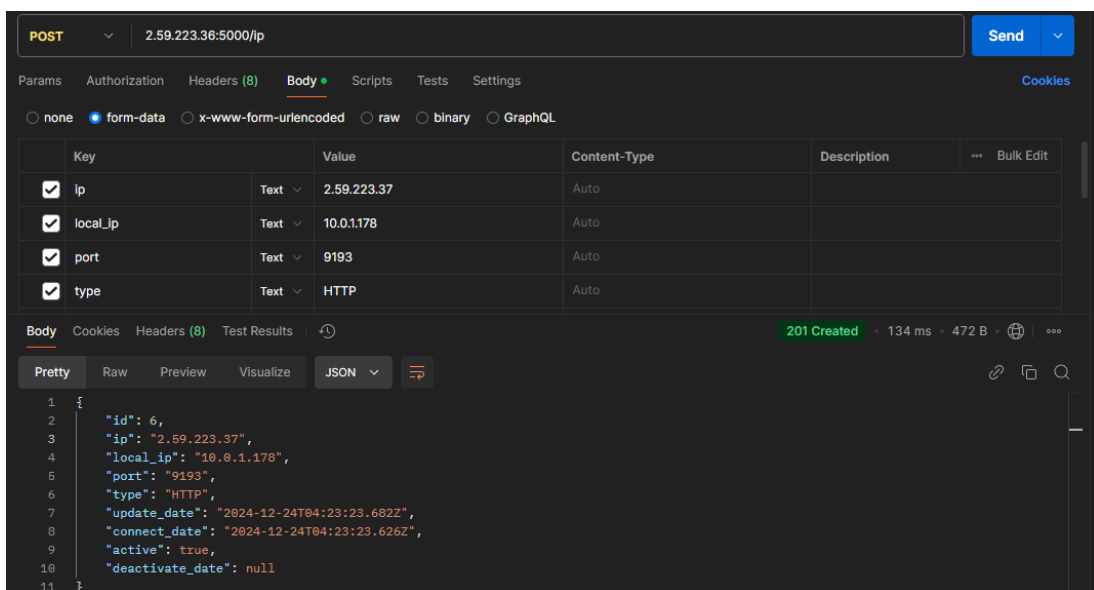
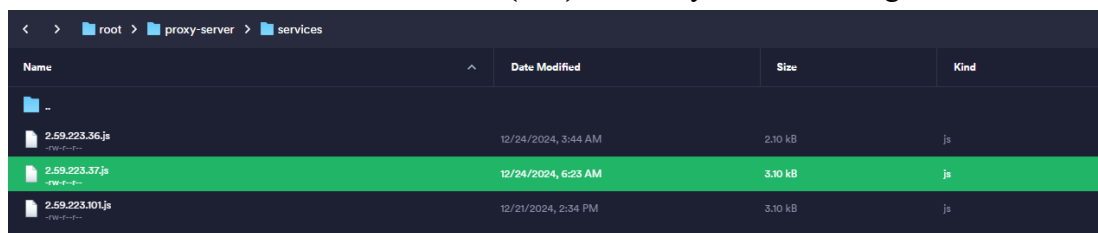
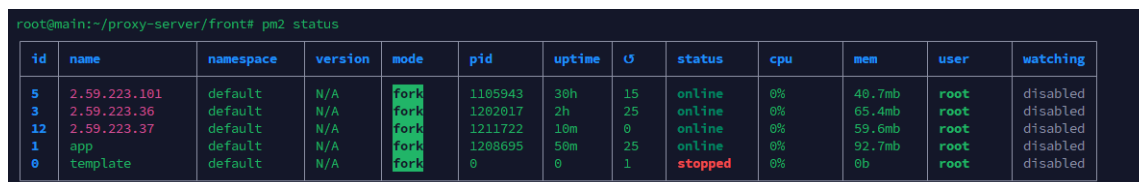


Рисунок 4 - Запит на створення екземпляру сутності ip



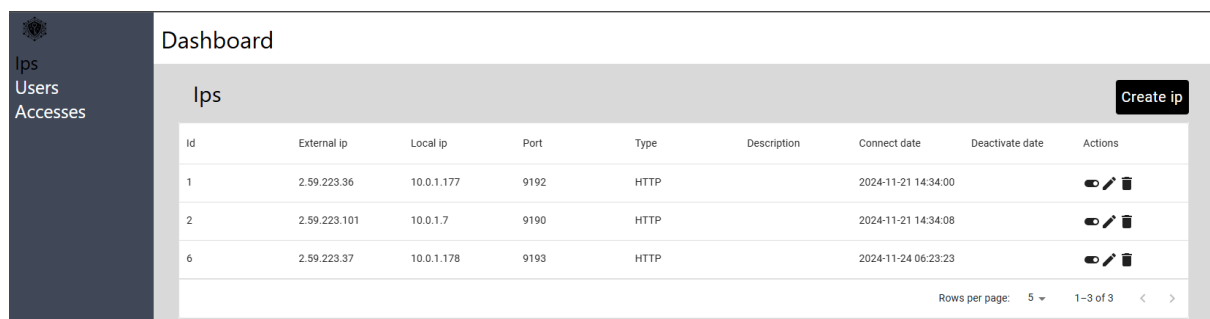
Name	Date Modified	Size	Kind
2.59.223.36.js	12/24/2024, 3:44 AM	2.10 kB	js
2.59.223.37.js	12/24/2024, 6:23 AM	3.10 kB	js
2.59.223.301.js	12/21/2024, 2:34 PM	3.10 kB	js

Рисунок 5 - Файл згенерований при створенні екземпляру сутності ip



id	name	namespace	version	mode	pid	uptime	U	status	cpu	mem	user	watching
5	2.59.223.101	default	N/A	fork	1185943	30h	15	online	0%	48.7mb	root	disabled
3	2.59.223.36	default	N/A	fork	1282017	2h	25	online	0%	65.4mb	root	disabled
12	2.59.223.37	default	N/A	fork	1211722	18m	0	online	0%	59.6mb	root	disabled
1	app	default	N/A	fork	1288695	58m	25	online	0%	92.7mb	root	disabled
0	template	default	N/A	fork	0	0	1	stopped	0%	0b	root	disabled

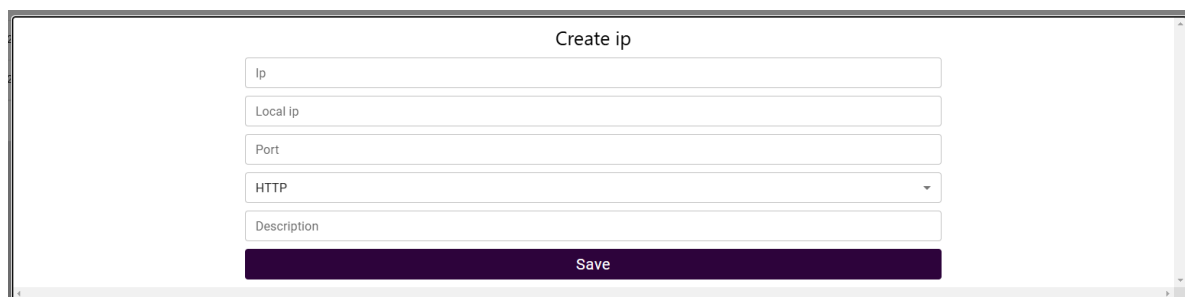
Рисунок 6 – Процес, запущений при створенні екземпляру сутності ip



Id	External ip	Local ip	Port	Type	Description	Connect date	Deactivate date	Actions
1	2.59.223.36	10.0.1.177	9192	HTTP		2024-11-21 14:34:00		 
2	2.59.223.101	10.0.1.7	9190	HTTP		2024-11-21 14:34:08		 
6	2.59.223.37	10.0.1.178	9193	HTTP		2024-11-24 06:23:23		 

Рисунок 7 - Сторінка /ip

При натисканні на кнопку «Create ip» відкривається модальне вікно редагування (рисунок 8).



Create ip

Ip

Local ip

Port

HTTP

Description

Save

Рисунок 8 - Модальне вікно створення нового екземпляру сутності ip

Сторінка /user функціонально повторює сторінку /ip. Оскільки екземпляри сутності access деактивуються автоматично, на сторінці /access відсутні кнопки для маніпулюванням станом активності. Якщо доступ потрібно припинити або продовжити - необхідно через модальне вікно редагування змінити дату закінчення.

Існує велика кількість програмних рішень для створення проксі-серверів з урахуванням специфічних потреб, таких як швидкість обробка запитів, гнучкість конфігурації та рівень безпеки: Squid Proxy, Tinyproxy, Privoxy, HAProxy, Dante тощо. В цій робо-

ті аналізується продуктивність різних підходів до реалізації проксі-серверів (порівнюються проксі-сервер, створений за допомогою розробленого програмного пакету із популярними існуючими реалізаціями Squid Proxy та Tinyproxy), визначення їхніх переваг та недоліків у різних умовах. Особливу увагу приділено порівнянню часу обробки запитів до популярних веб-ресурсів, що надає змогу оцінити ефективність кожного рішення в реальних сценаріях використання.

Тестовим стендом є віртуальний виділений сервер орендований на сервісі oncloudplanet.com. Сервер розташований у місті Київ. Для тестування швидкодії використано програму FOGLDN Proxy Tester, запущену локально на персональному комп'ютері у місті Дніпро.

При тестуванні перевіряється підключення до сторінок: <https://www.google.com/>, <https://www.youtube.com/>, <https://github.com/>, <https://x.com/home> і <https://stackoverflow.com/>. До кожної сторінки зроблено 100 ітерацій запитів, по черзі через кожне із досліджуваних рішень. В результатах розглядається середня затримка в мілісекундах.

Таблиця 1

Результати тестування в однопоточному режимі

	Проксі-сервер на Node.js	Squid Proxy	Tinyproxy
https://www.google.com/	127	126	186
https://www.youtube.com/	211	206	270
https://github.com/	164	157	224
https://x.com/home	210	203	307
https://stackoverflow.com/	243	236	282

Таблиця 2

Результати тестування в багатопоточному режимі

	Проксі-сервер на Node.js	Squid Proxy	Tinyproxy
https://www.google.com/	147	169	253
https://www.youtube.com/	226	241	312
https://github.com/	184	199	267
https://x.com/home	224	216	355
https://stackoverflow.com/	251	260	288

В однопоточному режимі (таблиця 1) середній показник проксі-сервера на Node.js 191 мс, Squid Proxy 186 мс, а Tinyproxy 254 мс. В багатопоточному режимі (таблиця 2) середній показник проксі-сервера на Node.js 206 мс, Squid Proxy 217 мс, а Tinyproxy 295 мс. Таким чином в однопоточному режимі проксі-сервера на Node.js на 2.69% повільніше ніж Squid Proxy і на 32.98% швидше ніж Tinyproxy, а в багатопоточному режимі на 5.34% швидше ніж Squid Proxy і на 43.20% ніж Tinyproxy.

Дослідження показало, що у режимі обробки послідовних запитів Squid Proxy демонструє найкращі результати завдяки своїй оптимізованій архітектурі, тоді як проксі-

сервер на Node.js лише трохи поступається йому за швидкістю, випереджаючи Tinypoxy із значним відривом.

У багатопоточному режимі проксі-сервер на Node.js виявився найбільш ефективним, випередивши Squid Proxy, що свідчить про його здатність обробляти високі навантаження та виконувати одночасні запити швидше. Tinypoxy, натомість, демонструє найнижчу продуктивність в обох режимах, що обмежує його застосування у сценаріях з підвищеними вимогами до швидкодії.

Аналіз показників також підкреслює перспективність застосування Node.js для створення проксі-серверів у сценаріях, де важливий баланс між продуктивністю та простотою реалізації.

Висновки. Удосконалений підхід до створення проксі-серверів, запропонований у рамках цієї роботи, сприяє значному зниженню витрат часу і матеріальних ресурсів завдяки впровадженню сучасних технологій. Використання платформи Node.js дозволяє забезпечити високу продуктивність та асинхронну обробку запитів, що робить розроблений програмний пакет ефективним і гнучким у застосуванні для різних сценаріїв. Крім того, вдосконалений підхід забезпечує підвищення якості створених проксі-серверів за рахунок модульної архітектури, що дозволяє легко масштабувати систему, адаптувати її під змінні навантаження та інтегрувати додаткові функції, такі як фільтрація трафіку, кешування або шифрування. Подальший розвиток запропонованих досліджень слід реалізовувати в напрямку розширення методів авторизації запитів, додавання можливості створення чорних і білих списків, більшої кількості способів обмеження доступу (наприклад обмеження по обсягу або IP-доступу).

ЛІТЕРАТУРА

1. Blocking vs Non-Blocking in NodeJS – What’s the Difference? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://cloudinfrastructureservices.co.uk/blocking-vs-non-blocking-in-nodejs/>
2. Тренди у розвитку проксі-технологій та їхнє майбутнє [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://go-proxy.com/ua/trendi-u-rozvitku-proksi-tehnologij-ta-yihnye-majbutnye>
3. Exploring Event-Driven Architecture: A Beginner's Guide for Cloud Native Developers [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://wso2.com/blogs/thefsource/exploring-event-driven-architecture-a-beginners-guide-for-cloud-native-developers/>
4. Service proxy, service mesh or API gateway – which do you need? [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: <https://tyk.io/blog/res-service-proxy-service-mesh-or-api-gateway-which-do-you-need/>
5. The Role of Proxy Servers in Web Security [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://cloudinfrastructureservices.co.uk/the-role-of-proxy-servers-in-web-security/>
6. NodeJS API-Part 5 / Model/Router/Controller structure [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://soonsantos.medium.com/nodejs-api-part-5-model-router-controller-structure-c5b13c2660ae>.

REFERENCES

1. Blocking vs Non-Blocking in NodeJS – What's the Difference? [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://cloudinfrastructureservices.co.uk/blocking-vs-non-blocking-in-nodejs/>
2. Trendy u rozvytku proksi-tekhnologii ta yikhnies maibutnie [Elektronnyi resurs] – Re-zhym dostupu do resursu: <https://go-proxy.com/ua/trendi-u-rozvitku-proksi-tehnologij-ta-yihnye-majbutnye>
3. Exploring Event-Driven Architecture: A Beginner's Guide for Cloud Native Developers [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://wso2.com/blogs/thefsource/exploring-event-driven-architecture-a-beginners-guide-for-cloud-native-developers/>
4. Service proxy, service mesh or API gateway – which do you need? [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu do resursu: <https://tyk.io/blog/res-service-proxy-service-mesh-or-api-gateway-which-do-you-need/>
5. The Role of Proxy Servers in Web Security [Elektronnyi resurs]. – Rezhym dostupu: <https://cloudinfrastructureservices.co.uk/the-role-of-proxy-servers-in-web-security/>
6. NodeJS API-Part 5 / Model/Router/Controller structure [Elektronnyi resurs] – Rezhym dostupu: <https://soonsantos.medium.com/nodejs-api-part-5-model-router-controller-structure-c5b13c2660ae>.

Received 05.02.2025.
Accepted 07.02.2025.

Exploring the possibilities of the node.js platform in the development of proxy servers, taking into account modern requirements for performance and stability

Proxy servers play a key role in modern information systems, providing efficient, secure and scalable operation of networks. Their use allows you to optimize traffic, increase productivity, ensure confidentiality and stability in various environments from corporate networks to personal users. In the field of proxy server development, asynchronous platforms have gained significant popularity and importance. They can significantly increase productivity, improve scalability and ensure smooth servicing of a large number of simultaneous connections. The paper examines the capabilities of the Node.js platform for developing a proxy server using an asynchronous approach and the implementation of independent subservices, in particular, the process of creating your own proxy server implementation is described, including architectural solutions and the modules used. Performance testing was conducted in the FOGLDN Proxy Tester program for the proposed solution, the results of which were compared with the indicators of other popular implementations of Squid Proxy and Tinyproxy. Based on the obtained data, an analysis of the proposed proxy server efficiency was performed, which emphasized the prospects of using Node.js to create proxy servers in scenarios where the balance between performance and ease of implementation is important. The JavaScript programming language, Node.js platform, SQLite database, ORM Sequelize, PM2 process manager, and React library were used to implement the software package.

Спирінцев В'ячеслав Васильович - к.т.н., доцент, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем НТУ "Дніпровська політехніка".

Спирінцева Ольга Володимирівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри електронних обчислювальних машин Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

Генчук Олексій Станіславович – магістр, НТУ "Дніпровська політехніка".

Spiritsev Viacheslav Vasylovych - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of Computer System's Software Department of Dnipro University of Technology.

Spiritseva Olga Volodymyrivna - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of Computer Department of Oles Honchar Dnipro National University.

Henchuk Oleksii Stanislavovych – master, Dnipro University of Technology.

МОДЕЛЬ СИСТЕМИ ТЕПЛОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БУДИНКУ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОНАСОСНОЇ УСТАНОВКИ

Анотація. У статті представлено динамічну модель системи теплозабезпечення будинку на основі теплонасосної установки (ТНУ), розроблену в середовищі MATLAB Simulink із використанням блоків Simscape для моделювання теплових процесів. Актуальність дослідження підкреслюється необхідністю скорочення використання викопного палива, що підвищило попит на енергоефективні технології та системи, засновані на відновлюваних джерелах енергії. Оптимізація таких систем є критично важливим завданням у контексті глобальних зусиль щодо підвищення енергоефективності будівель.

Модель враховує конструктивні особливості будинку, зокрема матеріали огорожувальних конструкцій, та їх теплотехнічні характеристики. Враховано динаміку зміни таких зовнішніх факторів як температура навколишнього середовища та сонячна активність. Погодинні погодно-кліматичні дані для міста Києва, які використані в моделі, дають можливість дослідити режими роботи системи теплозабезпечення із врахуванням зміни зовнішніх факторів, що впливають на тепловий режим будівлі.

Особливу увагу в дослідженні приділено взаємодії моделі теплонасосної установки з моделями системи опалення та будинку. Модель теплонасосної установки реалізовано на базі нейронної мережі LSTM, що суттєво скоротило час моделювання режиму роботи теплонасосної установки.

Модель дає можливість дослідження динамічних режимів роботи, а також проводити порівняльний аналіз різних видів систем керування (ПД-регулятор, модельно-прогнозуюче керування тощо). Дослідження демонструє, що використання таких алгоритмів дозволяє оптимізувати роботу ТНУ, знижуючи енергоспоживання без втрати комфорту в приміщеннях. Крім того, проведено валідацію моделі шляхом порівняння результатів імітаційного моделювання з квазістаціонарними розрахунками відповідно до національних стандартів, що підтверджує її достатню точність.

Результати дослідження можуть бути використані для подальшого розвитку систем керування теплозабезпеченням будівель із використанням теплових насосів та для дослідження різних стратегій управління енергоспоживанням, зокрема в контексті підвищення енергоефективності.

Ключові слова: теплонасосна установка, система теплозабезпечення, динамічний режим, Simulink, нейронна модель.

Постановка проблеми. Проблематика енергоефективності будівель та систем теплозабезпечення є однією з найважливіших тем у сучасних наукових дослідженнях, зокрема у контексті зростаючого попиту на відновлювані джерела енергії. Теплонасосні установки, які відомі своєю економічною ефективністю, стали поширеними як ключовий елемент у забезпеченні тепла для будівель. Впровадження сучасних технологій моделювання дозволяє створювати динамічні моделі систем теплозабезпечення, що допомагає досліджувати їх поведінку за різних умов. Моделювання у середовищі Simulink дає можливість аналізувати роботу систем тепlopостачання, їх енергоспоживання та ефективність у режимі реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У статті [1] автори представили комплексну модель теплового насоса на основі парокомпресійного циклу з використанням холодоагенту R-407c. Модель була реалізована в Simscape, де автори змоделивали основні компоненти системи — компресор, конденсатор, випарник та будинок. Особливістю цієї роботи є можливість налаштування параметрів кожного компонента для адаптації під різні умови експлуатації, що забезпечує високу точність моделювання реальних динамічних процесів тепlopостачання будинку.

В матеріалі [2] розглянуто теплове моделювання будинку разом із системою ОВіК. Використовуючи середовище Simulink, автори створили модель, яка здатна враховувати динамічні зміни теплопередачі у будівлі, що робить її дуже гнучкою для різноманітних сценаріїв роботи системи тепlopостачання. Основною перевагою є використання інтегрованої системи, яка поєднує будинок і систему ОВіК для кращого аналізу взаємодії між ними.

Модель підлогового опалення, описана у статті [3], демонструє застосування теплового насоса для живлення підлогового опалення. Особливої уваги заслуговує можливість інтеграції такої системи з Simulink для моделювання процесу теплопередачі через підлогу, що є важливим для аналізу енергоефективності під час експлуатації.

У роботі [4] розглянуто застосування алгоритму нечіткої логіки для керування системою тепlopостачання. Автори використали Simulink як платформу для моделювання, щоб продемонструвати, як нечітка логіка може покращити контроль над температурними параметрами у будинку. Ця модель дозволяє гнучко налаштовувати правила керування залежно від зміни зовнішніх умов.

Дослідження [5] акцентує увагу на використанні Simulink для динамічних симуляцій систем опалення. Особливістю цієї роботи є її простота, що дозволяє легко адаптувати модель для різних типів систем та сценаріїв тепlopостачання. Це робить модель доступною для широкого кола дослідників, які займаються подібними системами.

Стаття [6] пропонує базову модель теплового насоса, яка може бути інтегрована в Simulink для досліджень тепlopостачання житлових будинків. Простота цієї моделі дозволяє зосередитися на базових параметрах роботи насоса, проте вона обмежена в плані складніших сценаріїв розподілу тепла.

У статті [7] описується модель теплового насоса, що використовує відновлювані джерела енергії, такі як ґрунтове тепло. Важливим аспектом є можливість моделювання

сезонних змін теплового потоку, що робить систему ефективною в довгостроковій перспективі. Ця робота демонструє потенціал використання ґрунтових теплових насосів для підвищення енергоефективності будинків.

Остання стаття [8] досліджує роботу теплового насосу в комбінованих режимах — для одночасного обігріву та охолодження приміщень. Модель, розроблена в MATLAB, дозволяє симулювати роботу системи у різних умовах, однак її точність залежить від якості вхідних даних.

Аналіз наукових робіт показує, що розробка моделі теплозабезпечення будинку з тепловим насосом в Simulink є актуальним дослідженням. Метою роботи є створення динамічної моделі для дослідження алгоритмів керування, аналізу енергоефективності та порівняння режимів роботи в реальних умовах.

Мета дослідження - розробити та оптимізувати динамічну модель системи теплозабезпечення будинку на основі теплонасосної установки (ТНУ) в середовищі MATLAB Simulink для підвищення енергоефективності будівель. Дослідження спрямоване на зниження використання викопного палива та впровадження відновлюваних джерел енергії через оптимізацію керування системами теплозабезпечення з використанням сучасних алгоритмів, таких як ПД-регулятор та модельно-прогнозуюче керування.

Викладення основного матеріалу дослідження. Модель будинку розроблена у середовищі MATLAB Simulink із використанням блоків Simscape/Foundation Library/Thermal [9]. Метою моделювання є дослідження теплових режимів у будинку під час опалювального періоду, враховуючи внутрішні та зовнішні фактори.

Для створення енергетичної моделі використано план сучасного невеликого будинку. Загальна площа складає 49,44 м², висота стель – 2,7 м (рис. 1). Несучі стіни виконані з пустотілої цегли товщиною 0,4 м з утепленням у 0,05 м мінеральною ватою.

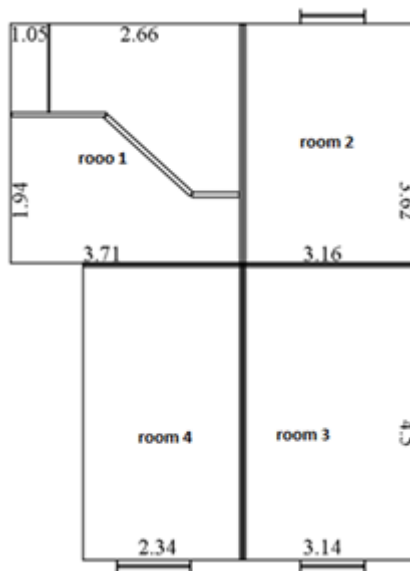


Рисунок 1 – Геометрична схема будинку

Огороджувальні конструкції моделювались як багатопарові елементи з різними теплотехнічними характеристиками. Вони включають такі блоки Simscape:

- Конвективний теплообмін – моделює передачу тепла через повітря між поверхнями;
- Теплопровідність – враховує теплопередачу через будівельні матеріали, що описується рівнянням теплопровідності Фур'є;
- Теплоакумуюча ємність – враховує акумуляцію теплоти всередині огорожувальних конструкцій.

Для кожної кімнати визначалися площі та опори теплопередачі зовнішніх стін, віконних конструкцій, стелі та підлоги (Рис. 2). В моделі також враховано вплив внутрішніх стін на процеси передачі теплоти між кімнатами.

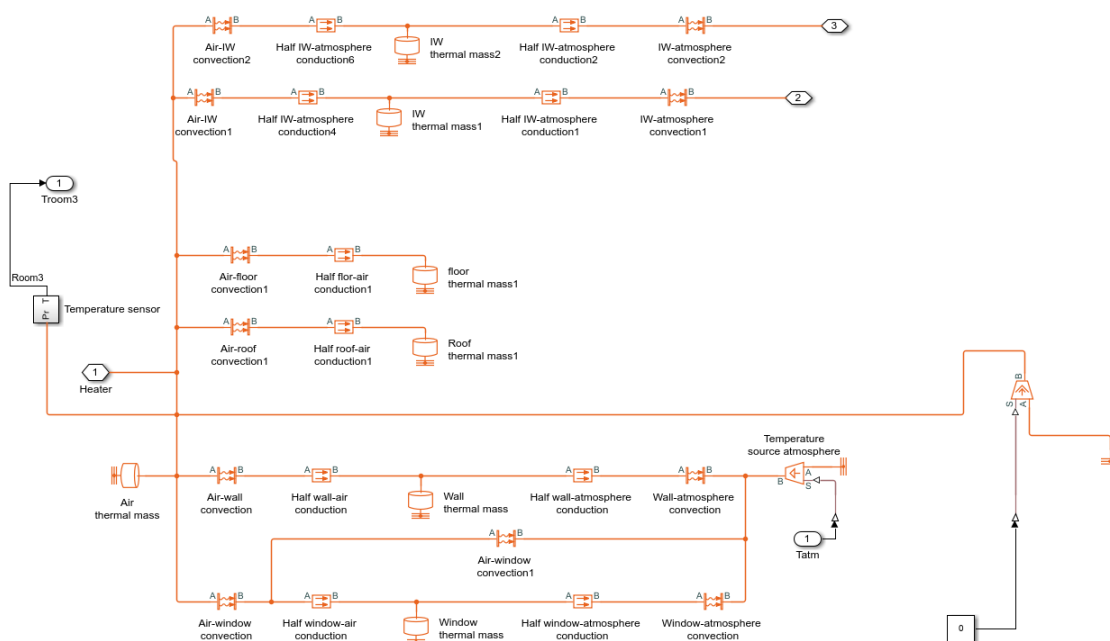


Рисунок 2 – Структурна схема теплофізичної моделі кімнати

Теплові потоки між кімнатами моделювалися з урахуванням конвективного теплообміну та теплопередачі. Для цього використовувалися блоки Simscape, які описують процеси передачі теплоти між суміжними приміщеннями через стіни, підлогу та стелю.

Одним з важливих елементів моделі є зовнішні фактори, які враховувалися під час моделювання. Було використано кліматичні дані для міста Київ на основі міжнародного погодного файлу IWEC[10]. Задавалися погодинні коливання зовнішньої температури, які впливали на теплові втрати через огорожувальні конструкції. Крім того, для кожної кімнати було визначено сонячні теплонадходження на основі орієнтації вікон (східна і західна сторони), а також враховано коефіцієнти пропускання сонячної радіації через склопакети.

В моделі (Рис. 4) враховано такі параметри опалювальних приладів:

- Проектна потужність приладів для кожної кімнати: спальня – 500 Вт, кухня – 880 Вт, коридор – 320 Вт;
- Постійна витрата теплоносія – 0,41 кг/с.

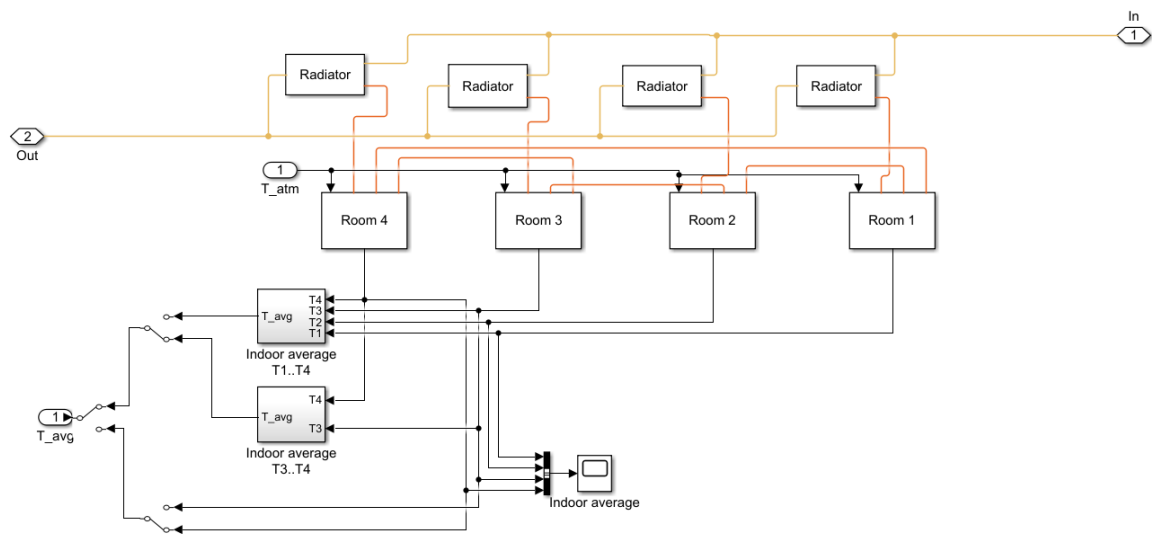


Рисунок 3 – Структурна схема моделі опалювальної системи

Окрему увагу приділено врахуванню теплових втрат та акумулюванню тепла в огорожувальних конструкціях. Теплові втрати через стіни, підлогу та стелю розраховувалися на основі коефіцієнтів теплопровідності кожного шару. Акумуляція тепла відбувається всередині матеріалів, що забезпечувало більш плавну зміну температури в кімнатах при зміні зовнішніх умов.

Розроблена модель дозволяє детально аналізувати теплові режими будівлі з урахуванням реальних кліматичних даних та характеристик будівельних матеріалів. Важливим є врахування інерційних властивостей огорожувальних конструкцій і їхнього впливу на енергоефективність будинку. Модель підходить для дослідження альтернативних систем опалення та їх керування.

Для валідації моделі було проведено порівняння результатів моделювання з квазістаціонарними розрахунками за стандартом ДСТУ Б А.2.2-12:2015[11], який враховує сезонні коливання температури та теплоаккумуляційні властивості конструкцій. Відхилення у 13% свідчить про достатню точність моделі для дослідження енергетичних характеристик будівель та систем теплозабезпечення. Модель є придатною для подальших досліджень різних алгоритмів керування та їх енергоефективності.

Розробка інтегрованої системи теплозабезпечення будинку на основі теплового насоса в Simulink є ключовим етапом у дослідженні ефективності різних алгоритмів керування та оптимізації енергоспоживання. Модель теплового насоса була розроблена на основі нейронної мережі LSTM [12] та інтегрована в середовище Simulink за допомогою S-функції [13], що дозволяє обробляти дані в режимі реального часу і здійснювати точні прогнози теплових процесів.

Модель ТНУ [13, 14, 15], що використовується як джерело теплової енергії, відповідає за генерацію тепла, яке передається в систему опалення будинку. Модель будинку, побудована на основі блоку Simscape Thermal, моделює теплову взаємодію між приміщеннями та зовнішнім середовищем. Це дає можливість досліджувати проце-

си генерації та передачі теплоти через систему опалення до внутрішнього повітря в приміщення.

Інтеграція моделей ТНУ, системи опалення та будинку здійснюється шляхом передачі відповідних сигналів через спеціальні блоки Simulink (Рис. 4). Температура води на виході з конденсатора теплового насоса є вхідним параметром для моделі системи опалення і використовується для розрахунку теплообміну в приміщенні.

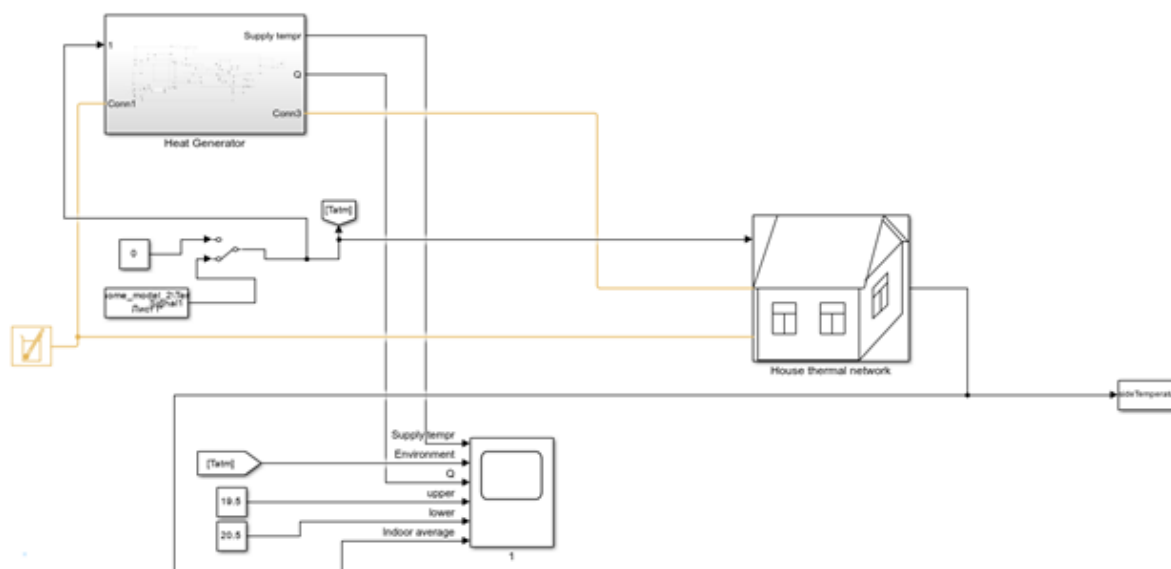


Рисунок 4 – Структурна схема загальної моделі ТНУ та системи теплозабезпечення будинку

Модель теплонасоса обробляє інформацію про зовнішні умови та теплове навантаження, розраховуючи тепловий потік для підтримки комфортної температури. Цей потік передається в модель будинку, яка моделює його розподіл, враховуючи теплові втрати, взаємодію між приміщеннями та вплив сонячної радіації для оцінки теплового балансу кожної кімнати.

Одним із ключових аспектів поєднання цих моделей є ефективне керування температурою всередині будинку. Модель теплового насоса реагує на зміни середньої температури в кімнатах, використовуючи замкнену систему керування для підтримки комфортного теплового режиму. Зокрема, за допомогою ПД [16] закону регулювання, теплонасосна установка змінює температуру прямої води в системі опалення для підтримання комфортної температури повітря в будинку.

На Рис. 5 показано три графіки, що ілюструють температурні процеси в інтегрованій системі теплонасосної установки та теплозабезпечення будинку. Верхній графік (Supply temp) – червона лінія показує зміну температури прямої води в системі опалення, яка варіюється від 38°C до 60°C через роботу ТНУ залежно від теплових навантажень і зовнішніх умов. Середній графік (Environment) – чорна лінія показує зміну зовнішньої температури від -10°C до 5°C, що впливає на тепловтрати будинку. Нижній графік (Indoor average) – синя лінія відображає стабільну середню температуру в кімнатах (19°C – 20°C), яка підтримується системою між заданими межами 19°C та 21°C.

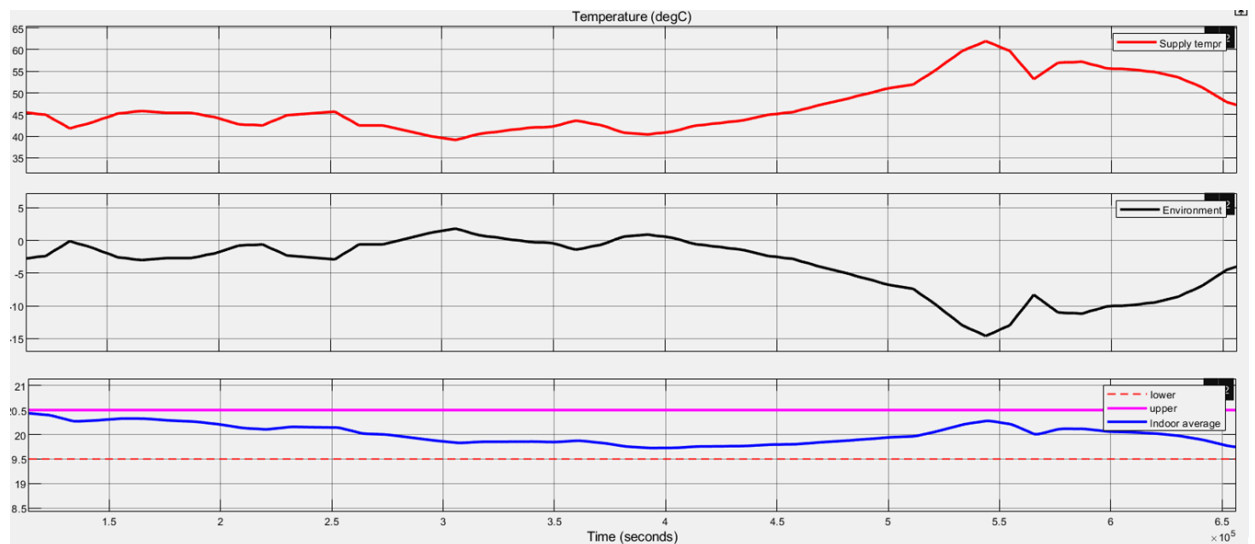


Рисунок 5 – Графіки роботи моделі теплозабезпечення будинку на основі ТНУ в середовищі Simulink

Поєднання моделі теплового насоса з моделлю будинку дозволяє дослідити різні стратегії керування, спрямовані на підтримання комфортних умов та підвищення енергоефективності системи. Зокрема, модель дає змогу оптимізувати роботу ТНУ з метою зниження споживання ним електроенергії без втрати комфорту в приміщеннях. Модель також дає змогу дослідити вплив зовнішніх факторів, таких як коливання температури та сонячна радіація, на загальну ефективність системи.

Висновки. У ході дослідження була успішно розроблена модель системи теплозабезпечення будинку на основі ТНУ в середовищі Simulink. Модель ТНУ, створена з використанням нейронної мережі LSTM та інтегрована через S-функцію, дає можливість моделювати динаміку теплових режимів у системі опалення. Також вона враховує динаміку зміни зовнішніх факторів та адаптувати роботу системи для підтримання стабільного теплового режиму.

Модель дозволяє детально досліджувати систему керування при різних умовах, аналізувати споживання енергії та тестувати різні налаштування та алгоритми керування. Результати дослідження мають практичну значущість для розробки енергоефективних систем опалення на базі ТНУ. Модель може бути використана для тестування різних алгоритмів керування, таких як ПІД-регулятори або алгоритми на основі штучного інтелекту, що сприяє оптимізації енергоспоживання та зниженню експлуатаційних витрат.

Подальший розвиток досліджень може включати розробку і впровадження інтелектуальних систем керування на основі прогнозування теплового навантаження з використанням нейронних мереж або інших методів машинного навчання. Таким чином, запропонована модель є перспективним інструментом для дослідження та оптимізації енергоефективних систем теплозабезпечення, що сприяє зниженню споживання енергії та підвищенню комфорту в будівлях.

ЛІТЕРАТУРА

1. Singh S., Sørensen K. Dynamic model of a heat pump based house heating system. *Proceedings of The 59th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 59)*. 2018. <https://doi.org/10.3384/ecp1815387>.
2. Thermal modelling of the building and its HVAC system using Matlab/Simulink. *International Journal of Sustainable Energy*. 2020.
3. Modelling and Simulation of Underfloor Heating System Supplied from a Heat Pump. *Energy Reports*. 2021.
4. Fuzzy Logic Control for House Heating System in Simulink. *Journal of Control and Automation Systems*. 2022.
5. Modelling of Heating Systems: Using Simulink for Dynamic Simulations. *Building Services Engineering Research and Technology*. 2020.
6. Simulink Modeling of a Residential Heat Pump System. *Journal of Building Performance*. 2021.
7. MATLAB/Simulink Model of Ground Source Heat Pump. *Renewable Energy and Environmental Sustainability*. 2020.
8. Heat Pump with Simultaneous Heating and Cooling Simulation in MATLAB. *Energy and Buildings*. 2020.
9. MathWorks. Simulink, Version R2022b. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc., 2022. URL: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>
10. Ashrae. International Weather for Energy Calculations (IWEC). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. 2020. URL: <https://www.ashrae.org>.
11. Мінрегіон України. ДСТУ Б А.2.2-12:2015. Склад та зміст кліматичних даних для розрахунків теплових і енергетичних характеристик будівель. Київ: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України. 2015.
12. Greff K., Srivastava R. K., Koutník J., Steunebrink B. R., Schmidhuber J. LSTM: A search space odyssey. *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*. 2017. Vol. 28. No. 10. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2582924>.
13. Волощук В. А., Шиндилюк П. В., Некрашевич О. В., Богза М. С., Гікало П. В. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «повітря-вода». *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34. № 73. С. 36-44. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.2/07.
14. Волощук В. А., Шиндилюк П. В., Некрашевич О. В., Богза М. С., Гікало П. В. Дослідження динамічних характеристик теплонасосної установки типу «вода-вода». *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2023. Т. 34. № 2. С. 36-44. DOI: 10.32782/2663-5941/2023.3.2/07.
15. Богза М. С., Волощук В. А. Застосування методів машинного навчання у задачах моделювання динаміки теплонасосних установок. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35. № 4. С. 52-58. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.4/09.
16. Astrom K. J., Murray R. M. Feedback systems: An introduction for scientists and engineers. 2nd ed. Princeton University Press, 2010. <https://doi.org/10.1515/9781400835355>.

REFERENCES

1. Singh, S., Sørensen, K. (2018). Dynamic model of a heat pump based house heating system. Proceedings of The 59th Conference on Simulation and Modelling (SIMS 59). <https://doi.org/10.3384/ecp1815387>
2. Thermal modelling of the building and its HVAC system using Matlab/Simulink. (2020). International Journal of Sustainable Energy.
3. Modelling and Simulation of Underfloor Heating System Supplied from a Heat Pump. (2021). Energy Reports.
4. Fuzzy Logic Control for House Heating System in Simulink. (2022). Journal of Control and Automation Systems.
5. Modelling of Heating Systems: Using Simulink for Dynamic Simulations. (2020). Building Services Engineering Research and Technology.
6. Simulink Modeling of a Residential Heat Pump System. (2021). Journal of Building Performance.
7. MATLAB/Simulink Model of Ground Source Heat Pump. (2020). Renewable Energy and Environmental Sustainability.
8. Heat Pump with Simultaneous Heating and Cooling Simulation in MATLAB. (2020). Energy and Buildings.
9. MathWorks. (2022). Simulink, Version R2022b. Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc. Available at: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>. Accessed: 24.08.2024.
10. ASHRAE. (2020). International Weather for Energy Calculations (IWECC). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Retrieved from <https://www.ashrae.org>.
11. Ministry of Regional Development of Ukraine. (2015). DSTU B A.2.2-12:2015. Climate data for heat and energy calculations of buildings. Kyiv: Ministry of Regional Development, Construction, and Housing of Ukraine.
12. Greff, K., Srivastava, R. K., Koutník, J., Steunebrink, B. R., Schmidhuber, J. (2017). LSTM: A search space odyssey. IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, 28(10), 2222-2232. <https://doi.org/10.1109/TNNLS.2016.2582924>
13. Voloshchuk, V. A., Shyndyliuk, P. V., Nekrashevych, O. V., Bohza, M. S., Hikalov, P. V. (2023). Doslidzhennya dynamichnykh kharakterystyk teplonasosnoyi ustanovky typu «pov-ityra-voda» [Research of the dynamic characteristics of an air-to-water heat pump system]. Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky, 34(73), 36-44. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/07>
14. Voloshchuk, V. A., Shyndyliuk, P. V., Nekrashevych, O. V., Bohza, M. S., & Hikalov, P. V. (2023). Doslidzhennya dynamichnykh kharakterystyk teplonasosnoyi ustanovky typu «vo-da-voda» [Research of the dynamic characteristics of a water-to-water heat pump system]. Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky, 34(2), 36-44. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.3.2/07>
15. Bohza, M. S., & Voloshchuk, V. A. (2024). Zastosuvannya metodiv mashynnoho navchannya u zadachakh modelyuvannya dynamiky teplonasosnykh ustanovok [Application of machine learning methods in modeling the dynamics of heat pump systems]. Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernads'koho. Seriya: Tekhnichni nauky, 35(4), 52-58. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/09>

16. Astrom, K. J., & Murray, R. M. (2010). Feedback systems: An introduction for scientists and engineers (2nd ed.). Princeton University Press. <https://doi.org/10.1515/9781400835355>

Received 05.02.2025.

Accepted 07.02.2025.

Development of a complex model of heat supply of a house based on a heat pump in the Simulink environment

The article presents a dynamic model of a house heat supply system based on a heat pump unit (HPU) developed in the MATLAB Simulink environment using Simscape blocks to model thermal processes. The relevance of the study is emphasized by the need to reduce fossil fuel consumption, which has increased the demand for energy-efficient technologies and systems based on renewable energy sources. Optimizing such systems is critical in the context of global efforts to improve building energy efficiency.

The model considers the structural features of the house, including the materials of the enclosing structures and their thermal characteristics. The dynamics of external factors such as ambient temperature and solar activity are also taken into account. Hourly weather and climate data for the city of Kyiv, used in the model, allow for the study of the operating modes of the heat supply system, taking into account external factors affecting the thermal regime of the building.

Special attention is paid to the interaction between the heat pump unit model and the heating system and house models. The heat pump unit model is implemented based on an LSTM neural network, significantly reducing the time required for simulating the operation mode of the heat pump. The model allows for the investigation of dynamic operating modes and comparative analysis of different types of control systems (PID controller, model predictive control, etc.).

The research demonstrates that using such algorithms optimizes the operation of the heat pump unit, reducing energy consumption without compromising indoor comfort. Furthermore, model validation was carried out by comparing simulation results with quasi-steady-state calculations according to national standards, confirming its sufficient accuracy.

The results of the study can be used for the further development of control systems for building heat supply using heat pumps and for the exploration of different energy management strategies, particularly in the context of improving energy efficiency.

Богза Микола - аспірант кафедри автоматизації енергетичних процесів, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна.

Бірюков Дмитро - Асистент кафедри теплової та альтернативної енергетики, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, Україна.

Bogza Mykola - post-graduate student of the Department of Energy Processes Automation, National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', Kyiv, Ukraine.

Biryukov Dmitry - Assistant of the Department of Thermal and Alternative Energy, National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute', Kyiv, Ukraine.

О.В. Гуда, Н.О. Генсіцька-Антонюк, О.В. Сухомлинова

ВПЛИВ ІНТЕРАКТИВНИХ МЕТОДІВ НАВЧАННЯ НА ЗАСВОЄННЯ МАТЕМАТИЧНИХ ЗНАНЬ

Анотація. Дослідження мало на меті оцінити доцільність і ефективність використання інтерактивних методів у навчанні математики в закладах вищої освіти. Особлива увага приділялася аналізу таких методів, як групові дискусії, рольові ігри, мультимедійні технології та проектна діяльність. Результати показали, що ці методи не тільки підвищують рівень засвоєння математичних знань, але й сприяють розвитку практичних навичок, критичного мислення та здатності до глибшого аналізу матеріалу. В межах проведеного дослідження було обґрунтовано впровадження методу компетентнісних співвідношень, що дозволяє оцінювати результативність інтерактивного навчання за п'ятьма ключовими компонентами: змістовним, практичним, логіко-структурним, технологічним та інформаційним. Застосування цього методу сприяє комплексному аналізу ефективності інтерактивних підходів завдяки використанню екстенсивних параметрів. Оцінка базується на вимірюванні таких компетенцій, як здатність до роботи в команді, адаптивність знань до практичних ситуацій, аналітичне мислення та вміння аргументувати свої рішення. Виявлено, що інтерактивні методи підвищують мотивацію студентів, знижують рівень стресу під час навчання та покращують розуміння різноформатного навчального математичного матеріалу. Результати дослідження обґрунтовують необхідність ширшого впровадження інтерактивних методів у викладання математики, так сформовані рекомендації щодо фахового застосування цифрових платформ і мультимедійних технологій, які сприяють індивідуалізації навчального процесу та допомагають студентам більш глибоко і якісно засвоювати запропонований навчальний матеріал. Дослідження підтверджує, що систематичне використання інтерактивних методів у вищій освіті є ефективним засобом для підвищення якості математичної освіти та забезпечення її відповідності сучасним професійним вимогам. Результати дослідження можуть бути використані для розробки нових навчальних програм і курсів з математики, створення інтерактивних посібників і цифрових платформ, що дозволить оптимізувати процес засвоєння знань і підвищити успішність учнів. Також дослідження є цінним для освітніх реформ, спрямованих на модернізацію навчання та підвищення його ефективності.

Ключові слова: інтерактивне навчання, математичні знання, математика, навчальні компетенції, цифрові платформи, заклад вищої освіти, критичне мислення.

Постановка проблеми. Актуальність дослідження сформована на основі вимог сучасної вищої освіти щодо забезпечення імплементації і розвитку інноваційних та адаптивних методик навчання. На тлі стрімкого розвитку інформаційних технологій та зміни формату взаємодії студентів із навчальним матеріалом і постала наукова необхідність стосовно удосконалення традиційних підходів до викладання математики у закладах вищої освіти (ЗВО). Вивчення впливу інтерактивних методів на засвоєння математичних знань у ЗВО є актуальним не лише для підвищення якості освіти, а й для формування майбутніх фахівців, здатних не тільки адаптуватися до нових технологічних умов професійного життя, а і вирішувати задачі високого рівня складності та відповідальності.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Згідно до роботи Вдович С. [1], саме соціальне середовище та особиста взаємодія відіграють ключову роль у навчанні, оскільки активна участь сприяє кращому засвоєнню знань. Дослідження Калашнікова С., Базелюк Н., Базелюк О. [2] наголошують на важливості активного навчання, в якому студенти беруть на себе ініціативу у дослідженні, обговоренні та рішенні проблем, що є важливим при вивченні і математики.

У роботі Маринченко Г. М., Моцак С. І. [3] ігри розглядаються як природний спосіб пізнання, що дозволяє студентам розвивати логічне мислення та вміння аналізувати. Сучасні дослідження, такі як наукова стаття Фонарюк О. [4], доводить, що використання ігор у навчанні математики сприяє кращому розумінню абстрактних понять, оскільки дозволяє студентам використовувати математичні знання у контексті і подальших практичних завдань. Роль групових форм роботи у засвоєнні математичних знань активно обговорюється в дослідженні Гуржій А., Глазунова О., Волошина Т. [5], де продемонстровано, що колективна робота сприяє кращому засвоєнню матеріалу, коли в умовах групових дискусій студенти можуть обговорювати математичні проблеми, обмінюватися думками та розглядати альтернативні підходи до вирішення завдань.

Сучасні цифрові технології та віртуальні платформи відкривають широкі можливості для інтерактивного навчання, зокрема у вивченні математики. Дослідження від Сікора Я., Скоробагатська О., Лиходєєва Г., Максименко А., Цехмістер Ю. [6] підкреслює доцільність і ефективність використання мультимедійних технологій у навчальному процесі, які сприяють візуалізації математичних понять, що робить їх зрозумілішими для студентів. Практичні заняття та проєктна діяльність є ефективними методами для інтеграції теоретичних знань із практичними навичками. Згідно з дослідженням Юдіна С., Сухомлинова О., Велика А. [7], проєктна діяльність має сприяти розвитку критичного мислення, а також формування навичок вирішення оперативних проблем.

Мета дослідження. Метою дослідження оцінка доцільності і ефективності використання інтерактивних методів навчання у закладах вищої освіти та визначення ступеня їх впливу на рівень засвоєння наданих математичних знань.

Поставлені завдання дослідження наступні: дослідити методичні і практичні варіації використання інтерактивного навчання; дослідити і оцінити рівень ефективності універсальних інтерактивних методів навчання при викладанні математики у ЗВО: об-

ґрунтувати можливості і шляхи розвитку інтерактивних методів для формування ключових компетенцій, необхідних при навчанні математики.

Викладення основного матеріалу дослідження. Інтерактивне навчання набуває все більшого поширення і поваги у вищій освіті, оскільки відповідає сучасним вимогам до формування у студентів не лише теоретичних знань, але й практичних (прикладних) компетенцій, розвитку критичного мислення та здатності до проведення рівневого аналізу [2]. В якості основи методу організації і оцінки ефективності інтерактивного навчання нами пропонується метод компетентісних співвідношень, які дозволять здійснювати оцінку ефективності будь-якої системи навчання за п'ятьма класами наповнення дисципліни: 1) змістовний (S1), 2) практичний (S2), 3) логіко-структурний (S3), 4) технологічний (S4) і 5) інформаційний (S5) (рис. 1.).

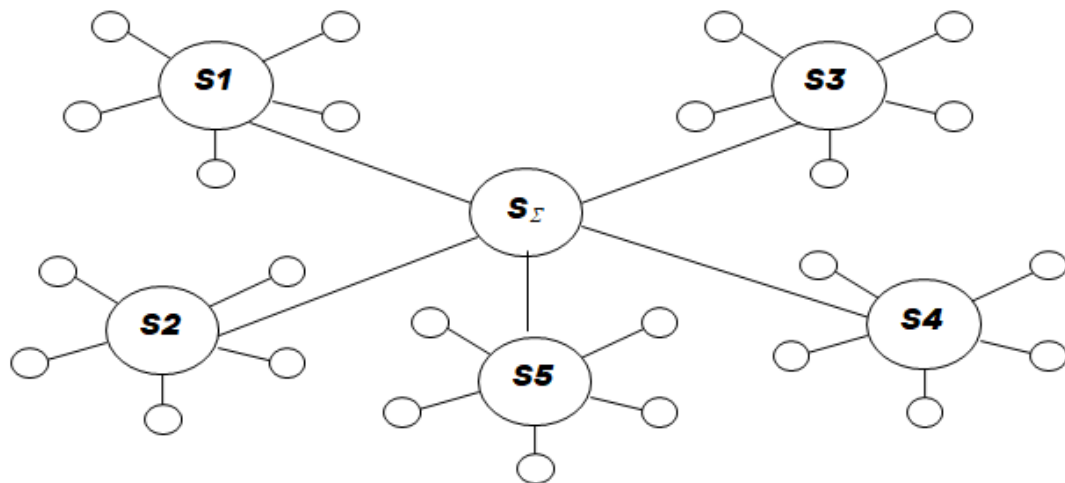


Рисунок 1 – Структура поділу інтерактивного навчання на визначальні складові (побудовано авторами)

Кожен з вище наведених кластерів S_i має своє ідеальне значення, виражене в одному з екстенсивних параметрів по відношенню до цілого цієї екометричної системи, тобто до суми всіх п'яти складових:

$$S_{\Sigma} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + \sum_{i=1}^n S_i = S_{\Sigma}(t) \quad (1)$$

де $i=1,2,3,4,5$ відповідає змістовному, практичному, логіко-структурному, 4) технологічному і інформаційному компоненту навчання. Сумарне значення S_{Σ} змінюється з часом. Період еволюції системи істотно більше періоду перебудови інтерактивного навчання $\{S_i\}$ системи в ідеальний стан $\{S_i\}$ в кожен момент часу [8].

Впровадження ігрових методів навчання дає впевненість в їх доцільній ефективності і інструментальній чіткості для залучення студентів до вивчення математики, оскільки вони створюють мотивуюче та змагальне середовище, що сприяє активному сприйняттю лекційного і семінарського матеріалу. Використання ігрових методів у навчанні математики допомагає розвивати логічне мислення, навички швидкого аналізу та застосування широкої гами математичних підходів (рис .2). Ігрові елементи в на-

вчання надають студентам можливість «грати з математикою», що допомагає знизити стрес від складних задач і сприяє позитивному ставленню до самої математики [4].

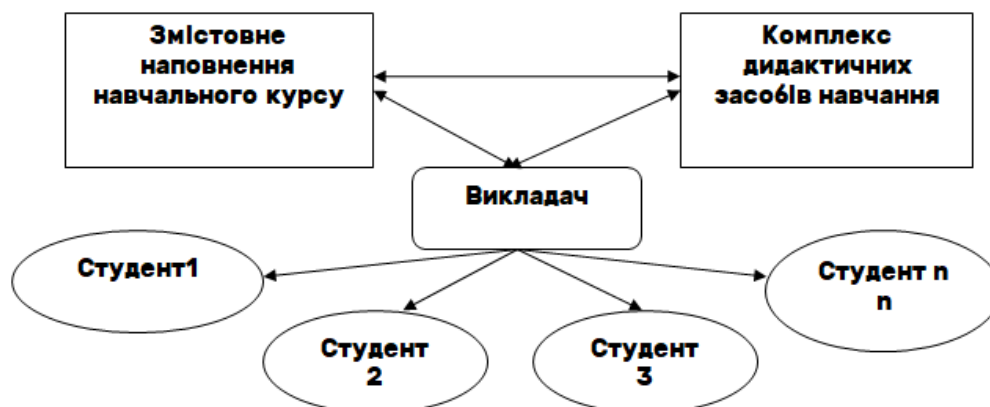


Рисунок 2 – Схема інтерактивного процесу навчання на базі ігрового методу (побудовано авторами)

У свою чергу, рольові ситуації набули статусу важливого компонента розвитку інтерактивного навчання, оскільки дозволяють відтворити реальні або гіпотетичні ситуації, у яких студенти застосовують отримані математичні знання для розв'язання певних типів практичних кейсів або завдань [9].

Групові види робіт, такі як дискусії, обговорення та колективні рішення завдань – є невід'ємною складовою інтерактивного підходу у навчанні математики, їхня сукупність здатна сприяти розвитку комунікаційних навичок, розвивати навички критичної аргументації та аналітичного мислення. Під час дискусій студенти мають можливість обмінюватися думками, аналізувати різні підходи до вирішення задачі, що допомагає їм краще зрозуміти та засвоїти матеріал, також зазначаємо, що дискусії під час вивчення математики можуть бути організовані за принципом «мозкового штурму», коли студенти висловлюють різні ідеї та підходи до вирішення задач, а також аналізують їхню прикладну доцільність та подальшу ефективність (рис. 3) [10].

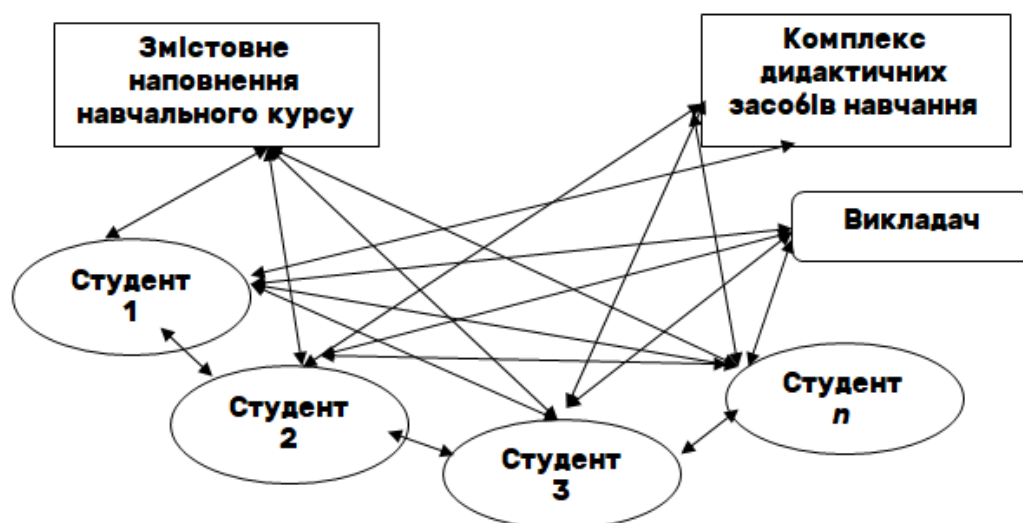


Рисунок 3 – Схема проблемно-пошукового методу інтерактивного навчання із застосуванням рольового методу (побудовано авторами)

Аудиторні форми обговорення завдань і результаті їхнього розв'язання для студентів формують умови для опрацювання навчального матеріалу разом і шукаючи оптимальні варіанти рішень, що додатно впливає на ефективність засвоєння навчального (тематичного) матеріалу. Робота в малих групах виглядатиме як колаборація серед студентів по обміну знаннями, взаємна допомога для роботи із складними темами [11].

Мультимедійні технології не тільки інтегрують теоретичні концепції, але й включають до навчального процесу анімації, інтерактивні завдання, відео-лекції, графічні симуляції, що робить процес навчання більш якісним та інтуїтивно зрозумілим для студентської аудиторії. Крім того, платформи як MathLab, GeoGebra та Wolfram Alpha стають засадами для самостійного навчання та дослідження, допомагаючи студентам вивчати матеріал у зручний для них час та у власному темпі [12]. Завдяки віртуальним платформам освітній процес стає більш персоналізованим, зі свого боку і викладачі мають змогу створювати індивідуальні траєкторії навчання для кожного студента, контролюючи його успішність та забезпечуючи тьюторське супроводження (рис. 4) [13].

Проектна діяльність в навчальному процесі здатна допомогти студентам працювати над реальними або гіпотетичними проблемами, застосовуючи математику для вирішення ряду нових фахових і прогнозованих завдань.

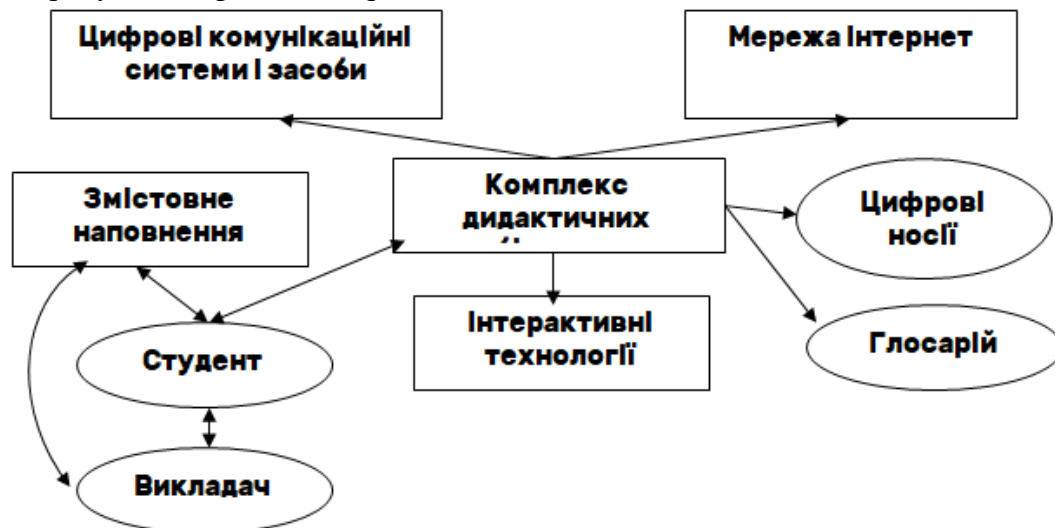


Рисунок 4 – Схема синхронної технології інтерактивного навчання із залученням мультимедійних технологій (побудовано авторами)

Подібні проекти реалізуються у індивідуальному або груповому форматі, що активно надалі сприяє розвитку комунікаційних навичок, розбудови командної роботи та формує здатність і вміння ефективно розподіляти обов'язки між всіма членами проектної команди [12] (табл. 1).

Ефективність активного використання інтерактивних методів для засвоєння математичних знань у закладах вищої освіти (сформовано авторами)

Метод інтерактив-ного на-вчання	Провідна пере-вага	Можливості за-безпечення якос-ті навчання	Забезпечення форму-вання ключових на-вчальних компетенцій	Доцільність широкого впроваджен-ня у ЗВО
1. Групові дискусії	Розвиток крити-чного мислення	Аналіз та аргу-ментація рішень	Комунікативні навич-ки, аналітичні здібнос-ті	Висока
2. Математичні ігри	Підвищення мо-тивації	Моделювання реальних задач	Креативність, аналіти-чні навички	Середня
3. Рольові си-туації	Розвиток прик-ладних навичок	Відтворення реал-ьних ситуацій	Здатність адаптуватися до умов	Середня
4. Проєктна ді-яльність	Практичне за-стосування тео-рії	Глибоке розу-міння через прак-тику	Командна робота, кри-тичне мислення	Висока
5. Мультиме-дійні технології	Візуалізація абс-трактних понять	Інтерактивні ві-зуалізації	Технічна грамотність, аналітичне мислення	Висока
6. Віртуальні платформи	Гнучкість та до-ступність	Індивідуальний підхід	Самостійне навчання, самооцінка знань	Висока

Цифрові платформи для навчання забезпечують легкий і ефективний доступ до багатьох програмних інструментів та онлайн ресурсів, які підвищують ефективність засвоєння математичних знань. До найбільш популярних платформ ми відносимо наступні: Khan Academy, GeoGebra, Wolfram Alpha, Desmos та Microsoft Math Solver, кожна з яких пропонує різноманітні функції для вивчення математичних тем і напрямків [14]. Наприклад, платформи типу GeoGebra дає програмну можливість візуалізувати складні математичні концепції, такі як функції, інтеграли, похідні, у графічному виконанні, і ці аспекти є фактором зростання рівня і засвоєння і розуміння абстрактних математичних тем.

Один із перспективних векторів розвитку цифрових платформ у вищій школі стала технологія штучного інтелекту (ШІ). Відзначаємо, що платформи типу Coursera та Edmodo використовують ШІ для практик забезпечення адаптивного навчання, в координатах яких відбувається забезпечення індивідуального підходу до кожного студента в академічній групі, що в подальшому підвищує як саму якість і бальну ефективність вивчення математики, оскільки кожен студент отримує навчальний контент, що відповідає його рівню підготовки та індивідуальним освітнім потребам [15].

Системи управління математичним навчанням (LMS) типів Google Classroom, Moodle, Canvas є досить ефективними і сучасними інструментами для організації інтерактивного навчання, де викладачі можуть розробляти інтерактивні завдання, організо-

увати онлайн-дискусії та відслідковувати прогрес кожного студента за певною академічною дисципліною. У віртуальних класах студенти можуть вільно і підковано інструментально обговорювати математичні задачі, спільно вирішувати проблеми та обмінюватися ідеями [4]. Цифрова трансформація сучасного навчання у ЗВО сприяє впровадженню інноваційних підходів і методик, зокрема інтерактивних методів навчання, які підвищують рівень засвоєння знань студентами. В умовах навчання математики інтерактивні методи дозволяють виявити "вузькі місця" в освітньому процесі, які можуть включати труднощі в розумінні складних тем чи недостатній рівень залучення студентів до навчальної діяльності.

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (1)$$

де x_i – кількість i -го виду навчальних компетенцій.

Така діагностика важлива для ефективного управління навчальним процесом і досягнення цілей цифрового освітнього середовища.

$$T = \{x \in R^n : x_i \geq 0, i = \overline{1, n}\} \quad (2)$$

При впровадженні інтерактивних методів важливо орієнтуватися на довгостроковий розвиток студентських компетенцій, що забезпечує ефективне засвоєння знань і формування практичних навичок. Це може бути досягнуто завдяки постійному вдосконаленню та адаптації навчальних програм і завдань, які відповідають потребам сучасного цифрового середовища.

$$f(\alpha x) = \alpha f(x) \quad \text{at} \quad \alpha > 1, \quad (3)$$

$$\alpha x = (\alpha x_1, \alpha x_2, \dots, \alpha x_n)^T.$$

При цьому можливий простір методів може розглядатися як сукупність інтерактивних підходів, які адаптуються до навчальних цілей і здатні забезпечити підвищення результативності навчання. В наступному кроці, функція цифрової трансформації матиме такий математичний вигляд:

$$\begin{aligned} f(\alpha x) &> \alpha f(x) \\ (f(\alpha x) &< \alpha f(x)). \end{aligned} \quad (4)$$

Функція інтерактивної трансформації відображає взаємозв'язок між змінами в методах навчання та рівнем засвоєння знань, що може бути пропорційним до досягнень у навчанні або ж мати інші залежності. Ця функція характеризує приріст навчальних досягнень, а також показує, наскільки гнучким та адаптивним є інтерактивний метод, що впроваджується у викладанні.

$$\varepsilon_i(x) = \frac{x_i}{f(x)} \cdot \frac{\partial f(x)}{\partial x_i}, i = \overline{1, n}. \quad (5)$$

Оцінка чутливості навчального процесу до інтерактивних змін важлива для оптимального використання нових методик. Для цього можна розрахувати еластичність ефективності навчання відносно різних інтерактивних параметрів, що дозволяє побу-

дувати адаптивний підхід до навчання, де інновації відповідають реальним потребам студентів і забезпечують максимальне засвоєння знань.

$$s_{ik}(x) = \frac{\frac{\partial f(x)}{\partial x_i}}{\frac{\partial f(x)}{\partial x_k}}, \quad i, k = \overline{1, n}. \quad (6)$$

Цей параметр показує, скільки додаткових змін k -го типу необхідно замість i -го, щоб функція цифрової трансформації залишилася незмінною. Крім того, в освітньому процесі нерідко виникає необхідність адаптації інтерактивних методів до різних груп студентів. Таким чином, оцінка ефективності інтерактивних методів навчання вимагає системного підходу, який враховує індивідуальні та колективні потреби щодо процесності і якості підготовки фахівців у ЗВО, забезпечуючи підвищення якості навчального процесу й досягнення цілей сучасної вищої освіти.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було проаналізовано, як інтерактивні методи навчання впливають на засвоєння студентами математичних знань у закладах вищої освіти. Особлива увага приділялась таким методам, як групові дискусії, рольові ситуації, математичні ігри, мультимедійні технології та практичні заняття. Кожен з цих підходів показав свою важливість у покращенні якості навчального процесу. Розроблено метод компетентнісних співвідношень, який дозволяє оцінювати ефективність інтерактивного навчання через п'ять основних аспектів: змістовний, практичний, логіко-структурний, технологічний та інформаційний.

ЛІТЕРАТУРА

1. Вдович С.М. Особливості наукової діяльності студентської молоді в закладі вищої освіти. *Наукові записки малої академії наук України*. 2022. №2 (24).
2. Вдосконалення викладання у вищій освіті: теорія та практика: монографія / [Калашнікова С., Базелюк Н., Базелюк О. та ін.] ; за наук. ред. С. Калашнікової. Київ : Інститут вищої освіти НАПН України, 2023. 255 с. DOI: <https://doi.org/10.31874/TE.2023>.
3. Маринченко Г. М., Моцак С. І. Формування критичного мислення студентів під час дистанційного навчання. *Міжнародний науковий журнал «Грааль науки»*. 2021. № 4. С. 463–467. <https://doi.org/10.36074/grail-ofscience.07.05.2021.083>.
4. Фонарюк О. В. Неформальна математична освіта: аналіз веб-ресурсів. *Фізико-математична освіта*. 2020. № 4(26). С.119-123.
5. Гуржій А. М., Глазунова О. Г., Волошина Т. В. Цифровий навчальний контент для системи відкритої освіти: Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання у підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми: Київ-Вінниця: ТОВ фірма «Планер», 2020. 268 с.
6. Sikora, Ya., Skorobahatska O., Lykhodieieva, H., Maksymenko, A., Tsekhmister, Y. (2023). Informatization and digitization of the educational process in higher education: main directions, challenges of the time. *Revista Eduweb*, Vol. 17, no2, 244-256. DOI: <https://doi.org/10.46502/issn.1856-7576/2023.17.02.21>.
7. Юдіна С. П., Сухомлинова О. В., Велика А. М. Стратегії мотивування студентів до

- участі у наукових проєктах. *Наукові інновації та передові технології*. 2024. № 8(36). С. 1483-1494. doi.org/10.52058/2786-5274-2024-8(36)-1483-1494.
8. Drobyazko S., Makedon V., Zhuravlov D., Buglak Y., Stetsenko V. Ethical, technological and patent aspects of technology blockchain distribution. *Journal of Legal, Ethical and Regulatory Issues*. 2019. Volume 22. Special Issue 2. URL: <https://www.abacademies.org/articles/Ethical-Technological-and-patent-aspects-of-technology-blockchain-distribution-1544-0044-22-SI-2-365.pdf>
9. Македон В. В., Маковецька А. О. Інформаційне забезпечення економічної безпеки підприємств в умовах ринкової нестабільності. *Міжнародний науковий журнал "Інтернаука". Серія: "Економічні науки"*. 2023. №12. URL: <https://www.inter-nauka.com/issues/economic2023/12/9477>. <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2023-12-9477>.
10. Гриб'юк О. О. Імерсивні технології у процесі навчання предметів математичного циклу: становлення нової освітньої парадигми. *Педагогічні науки: теорія та практика*. 2021. №4 (40). С. 35-45.
11. Македон В. В., Валіков В. П., Кошляк Є. Є. Світовий ринок праці в координатах цифрової економіки. *Академічний огляд*. 2020. №1 (52). С. 91-107. DOI: 10.32342/2074-5354-2020-1-52-9.
12. Коновальчук І. І. Проєктні технології здійснення інноваційної освітньої діяльності. Проблеми освіти: зб. наук. Праць. Інститут модернізації змісту освіти МОН України. 2017. Вип. 87. С. 133–139.
13. Shelukhin M., Kupriichuk V., Kyrylko N., Makedon V., Chupryna N. Entrepreneurship Education with the Use of a Cloud-Oriented Educational Environment. *International Journal of Entrepreneurship*. 2021. Volume 25. Issue 6. URL: <https://www.abacademies.org/articles/entrepreneurship-education-with-the-use-of-a-cloudoriented-educational-environment-11980.html>
14. Мар'єнко М., Коваленко В. Штучний інтелект та відкрита наука в освіті. *Фізико-математична освіта*. 2023. Том 38. № 1. С. 48-53. DOI: 10.31110/2413-1571-2023-038-1-007.
15. Панухник, О. (2023). Штучний інтелект в освітньому процесі та наукових дослідженнях здобувачів вищої освіти: відповідальні межі вмісту III. *Галицький економічний вісник*, Том 84, №4, 202-211. https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2023.04.202.

REFERENCES

1. Vdovych, S.M. (2022). Osoblyvosti naukovoї diialnosti studentskoi molodi v zakladi vyshchoї osvity [Features of scientific activity of student youth in higher education institutions]. *Naukovi zapysky maloї akademії nauk Ukrainy*, 2(24). URL: <http://doi.org/10.51707/2618-0529-2022-24-02>.
 2. Kalashnikova, S., Bazelyuk, N., Bazelyuk, O. (2023). Vdoskonalennya vykladannya u vyshchiiy osviti: teoriya ta praktyka: monohrafiya [Improving teaching in higher education: theory and practice: monograph]. Kyiv: Institute of Higher Education of the National Academy of Sciences of Ukraine. DOI: <https://doi.org/10.31874/TE.2023>.
 3. Marynchenko, H. M., Motsak, S. I. (2021). Formuvannya krytychnoho myslennya studen-
- ISSN 1562-9945 (Print)
ISSN 2707-7977 (Online)

tiv pid chas dystantsiynoho navchannya [Formation of students' critical thinking during distance learning]. International Scientific Journal "Grail of Science", 4, 463–467. <https://doi.org/10.36074/grail-ofscience.07.05.2021.083>.

4. Fonaryuk, O. V. (2020). Neformal'na matematychna osvita: analiz veb-resursiv [Informal mathematical education: analysis of web resources]. Fizyko-matematychna osvita, № 4(26), 119-123.

5. Gurzhii, A. M., Glazunova, O. G., Voloshina, T. V. (2020). Tsyfrovyi navchal'nyy kontent dlya systemy vidkrytoyi osvity: Suchasni informatsiyni tekhnolohiyi ta innovatsiyni metody navchannya u pidhotovtsi fakhivtsiv: metodolohiya, teoriya, dosvid, problemy [Digital educational content for the open education system: Modern information technologies and innovative teaching methods in the training of specialists: methodology, theory, experience, problems]. Kyiv-Vinnytsia: "Planer" LLC.

6. Sikora, Ya., Skorobahatska O., Lykhodieieva, H., Maksymenko, A., Tsekhmister, Y. (2023). Informatization and digitization of the educational process in higher education: main directions, challenges of the time. Revista Eduweb, Vol. 17, no2, 244-256. DOI: <https://doi.org/10.46502/issn.1856-7576/2023.17.02.21>.

7. Yudina, S. P., Sukhomlynova, O. V., Velyka, A. M. (2024). Stratehiyi motyvuvannya studentiv do uchasti u naukovykh proyektakh [Strategies for motivating students to participate in scientific projects.]. Naukovi innovatsiyni ta peredovi tekhnolohiyi, no 8(36), 1483-1494. [doi.org/10.52058/2786-5274-2024-8\(36\)-1483-1494](https://doi.org/10.52058/2786-5274-2024-8(36)-1483-1494).

8. Drobyazko, S., Makedon, V., Zhuravlov, D., Buglak, Y., Stetsenko, V. (2019). Ethical, technological and patent aspects of technology blockchain distribution. Journal of Legal, Ethical and Regulatory Issues, Volume 22, Special Issue 2, 2019: URL: <https://www.abacademies.org/articles/Ethical-Technological-and-patent-aspects-of-technology-blockchain-distribution-1544-0044-22-SI-2-365.pdf>

9. Makedon, V. V., Makovets'ka, A. O. (2023). Informatsiyni zabezpechennya ekonomichnoyi bezpeky pidpryyemstv v umovakh rynkovoyi nestabil'nosti. [Information provision of economic security of enterprises in conditions of market instability]. Mizhnarodnyy naukovyy zhurnal "Internauka". Seriya: "Ekonomichni nauky", 12. Available at: <https://www.inter-nauka.com/issues/economic2023/12/9477>. <https://doi.org/10.25313/2520-2294-2023-12-9477>.

10. Hryb'yuk, O. O. (2021). Imersyivni tekhnolohiyi u protsesi navchannya predmetiv matematychnoho tsykladu: stanovlennya novoyi osvith'oyi paradyhmy [Immersive technologies in the process of teaching subjects of the mathematical cycle: the formation of a new educational paradigm]. Pedagogichni nauky: teoriya ta praktyka, №4 (40), 35-45.

11. Makedon, V.V., Valikov, V.P., Koshlyak, E.E. (2020). Svitovyy rynek pratsi v koordynatakh tsyfrovyoi ekonomiky [The global labor market in the coordinates of the digital economy]. Academic Review, 1(52), 91-107. DOI: 10.32342/2074-5354-2020-1-52-9.

12. Konovalchuk, I. I. (2017). Projektni tekhnolohiyi zdiysnennya innovatsiynoyi osvith'oyi diyal'nosti [Project technologies for implementing innovative educational activities. Problems of education: coll. of science Proceedings], Vol. 87, 133–139.

13. Shelukhin, M., Kupriichuk, V., Kyrylko, N., Makedon, V., Chupryna, N. (2021). Entre-

preneurship Education with the Use of a Cloud-Oriented Educational Environment. International Journal of Entrepreneurship. Volume 25, Issue 6. URL: <https://www.abacademies.org/articles/entrepreneurship-education-with-the-use-of-a-cloudoriented-educational-environment-11980.html>

14. Maryenko, M., Kovalenko, V. (2023). Shtuchnyy intelekt ta vidkryta nauka v osviti [Artificial intelligence and open science in education]. Physical and mathematical education, Volume 38, 1, 48-53. DOI: 10.31110/2413-1571-2023-038-1-007.

Panukhnyk, O. (2023). Artificial intelligence in the educational process and scientific research of students of higher education: responsible limits of AI content. Galician Economic Bulletin, Volume 84, No. 4, 202-211. https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2023.04.202.

Received 08.02.2025.

Accepted 13.02.2025.

Influence of interactive teaching methods on mathematical knowledge acquisition

The purpose of the study was to assess the expediency and effectiveness of using interactive methods in teaching mathematics in institutions of higher education. Special attention was paid to the analysis of such methods as group discussions, role-playing games, multimedia technologies and project activities. The results showed that these methods not only increase the level of assimilation of mathematical knowledge, but also contribute to the development of practical skills, critical thinking and the ability to analyze the material in depth. Within the framework of the research, the implementation of the method of competence ratios was justified, which allows to evaluate the effectiveness of interactive learning according to five key components: meaningful, practical, logical-structural, technological and informational. The application of this method contributes to the comprehensive analysis of the effectiveness of interactive approaches due to the use of extensive parameters. The evaluation is based on the measurement of such competencies as the ability to work in a team, the adaptability of knowledge to practical situations, analytical thinking and the ability to justify one's decisions. It was found that interactive methods increase students' motivation, reduce the level of stress during learning, and improve understanding of multi-format educational mathematical material. The results of the study substantiate the need for a wider implementation of interactive methods in teaching mathematics, thus forming recommendations for the professional use of digital platforms and multimedia technologies, which contribute to the individualization of the educational process and help students to learn the proposed educational material more deeply and qualitatively. The study confirms that the systematic use of interactive methods in higher education is an effective means of improving the quality of mathematics education and ensuring its compliance with modern professional requirements. The results of the study can be used to develop new curricula and courses in mathematics, create interactive manuals and digital platforms, which will optimize the process of learning and increase student success. The study is also valuable for educational reforms aimed at modernizing teaching and increasing its efficiency.

Keywords: interactive learning, mathematical knowledge, mathematics, educational competencies, digital platforms, higher education institution, critical thinking.

Гуда Оксана Вікторівна - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики, Луцький національний технічний університет.

Генсіцька-Антонюк Наталія Олександрівна - кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри математики з методикою викладання, Рівненський державний гуманітарний університет.

Сухомлинова Олена Валеріївна - старший викладач кафедри математики та фізики, Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут.

Huda Oksana Viktorivna - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Higher Mathematics, Lutsk National Technical University.

Hensitska-Antonyuk Nataliya Oleksandrivna - Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Mathematics with Teaching Methods, Rivne State Humanitarian University.

Sukhomlynova Olena Valeriivna - Senior Lecturer of the Department of Mathematics and Physics, Heroiv Krut Military Institute of Telecommunications and Informatization.

ІМОВІРНІСНИЙ МЕТОД ПОРІВНЯННЯ НЕЧІТКИХ ЧИСЕЛ

Анотація. У статті пропонується новий імовірнісний метод порівняння нечітких чисел, який базується на імовірності відповідного відношення реальних значень. Наводяться обчислення для встановлення відповідного відношення в загальному вигляді для довільних функцій приналежності нечітких чисел. Досліджуються деякі формальні властивості запропонованого відношення та наводиться результат порівняння запропонованого підходу з відомими. Також у статті запропонована алгоритмічна реалізація операції порівняння нечітких чисел.

Ключові слова: нечіткі числа, порівняння нечітких чисел, алгоритмічне забезпечення, програмне забезпечення.

Вступ. У таких задачах, як аналіз даних і моделювання, звичайно передбачається наявність точних, повних і доступних даних про досліджуваний об'єкт. І в багатьох випадках можна спиратись на це припущення для успішного дослідження, аналізу, прогнозування, тощо, але так само поширені й умови, за яких дані характеризуються певною невизначеністю з тих чи інших причин, особливо при формуванні складного набору мультимодальних гетерогенних даних.

Джерела невизначеності можуть бути різноманітними.

З одного боку, певна невизначеність пов'язана із вимірювальними пристроями та способом їх застосування. У сучасних задачах це джерело рідко має значний вплив, адже для певних задач використовуються вимірювальні пристрої відповідного класу точності. Тим не менш, можливі випадки, коли їх неможливо застосувати бажаним чином без значного втручання в досліджуваний об'єкт або процес. Тоді доводиться застосовувати непрямі виміри, які певним чином корелюють із бажаними характеристиками, або отримувати вимірювання зі значною похибкою. Для прикладу, в [1] пропонується спосіб оцінки стану станка з ЧПУ та якості обробки деталей за допомогою вимірювань вібрації та споживання струму під час різних режимів роботи.

З іншого боку, інколи набір даних містить значення, що введені вручну. В такому випадку одразу допускається деяка міра суб'єктивної оцінки або неточності. Наприклад, медичні дані мають певну міру неточності, коли пацієнти повідомляють, що приймали ліки “приблизно о сьомій”, або відчували “незначний біль десь у животі”.

Врахування цієї невизначеності в методах і алгоритмах обробки даних у таких умовах є необхідним для отримання змістовних і точних висновків про досліджувані об'єкти. Для вирішення цієї задачі необхідний розвиток методів подання та обробки

нечітких значень, операцій і відношень над ними для застосування у програмних системах.

Постановка проблеми. Проблема, вирішення якої розглядається у цій статті, полягає у підвищенні ефективності обробки нечітких значень у програмних системах за рахунок розроблення нового методу порівняння нечітких чисел. Це є частиною більшого дослідження з використання нечітких чисел для представлення та обробки нечітких мультимодальних даних для створення цифрових двійників на основі алгебраїчної системи агрегатів [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Апарат нечітких чисел базується на нечіткій логіці і нечітких множинах, запропонованих Л. Заде в 1965. За цей час було запропоновано багато модифікацій, методів подання і застосування нечітких чисел. Наприклад, в [3] наводиться детальний опис основних понять нечітких чисел та деяких їхніх властивостей. Більш детальний аналіз поширених способів представлення нечітких чисел (відповідних функцій приналежності), узагальнення понять і операцій лінійної алгебри та математичного аналізу на випадок нечітких чисел та приклади їх застосування в реальних задачах наведені, наприклад, в [4].

Численні публікації присвячені і методам порівняння нечітких чисел [5, 6]. Огляд класів методів порівняння: порівняння за дійсним індексом, такі як [11-14] та інші, порівняння відносно відстаней до рангових множин [15, 16] і відокремлене попарне порівняння і відповідних представників кожного класу наводиться в [10]. В [7], окрім цього, також пропонується набір властивостей, якому мають відповідати методи порівняння нечітких значень.

Використання ж невизначеності даних в контексті цифрових двійників є темою сучасних досліджень і знаходиться на стадії формулювання основних принципів та категорій, дослідження класів невизначеності тощо [8, 9].

Викладення матеріалу дослідження.

Метод порівняння нечітких чисел.

Розглянемо два нечітких числа f і g , що задані функціями приналежності $f(x)$ та $g(x)$ відповідно. Для них визначимо відношення “менше з імовірністю β ” (позначимо $<_{\beta}$) так, що $f <_{\beta} g$ коли імовірність того, що реальне значення f менше за реальне значення g не менша за β . Тобто, $f <_{\beta} g \Leftrightarrow P(f < g) \geq \beta$ для деякого $\beta \in [0; 1]$. Аналогічно можна визначити $f >_{\beta} g \Leftrightarrow P(f > g) \geq \beta$, $f \approx_{\beta} g \Leftrightarrow P(f > g) < \beta$ і $P(f < g) < \beta$. Тепер розглянемо загальний спосіб обчислення цієї імовірності.

Для цього розглянемо множину можливих пар реальних значень f і g – точок з координатами (x_1, y_1) та (x_2, y_2) відповідно, які належать множині, що відсікається відповідною функцією приналежності. Імовірність $P(f < g)$ тоді дорівнює відношенню кількості пар, для яких $x_1 \leq x_2$, до кількості всіх можливих пар. Слід зазначити, що

у випадку неперервних множин кількість точок у них (і, відповідно, їхніх пар) нескінченна, тому ця задача розглядається з точки зору геометричної імовірності, де “кількості” точок відповідає площа множини, і надалі ці поняття можуть використовуватись взаємозамінно.

На рис. 1 наведено приклад таких чисел f і g , для яких $\text{supp}(f) = [f_1; f_2]$ (синій колір) та $\text{supp}(g) = [g_1; g_2]$ (помаранчевий колір).

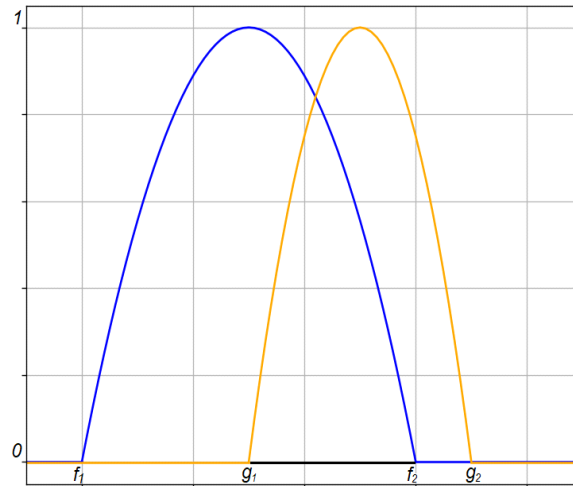


Рисунок 1 - Приклад нечітких чисел f і g , які порівнюються

Щоб визначити кількість пар можливих реальних значень f і g розглянемо інтервал гранично малої ширини dx , який належить до множини точок, обмежених функцією приналежності g і області-підмножини f , в яких $x_1 \leq x_2$. На рис. 2 наведено приклади таких інтервалів (червоний колір) та відповідних підмножин в f , у яких реальне значення f менше або дорівнює значенням з підмножини dx (світло-синій колір).

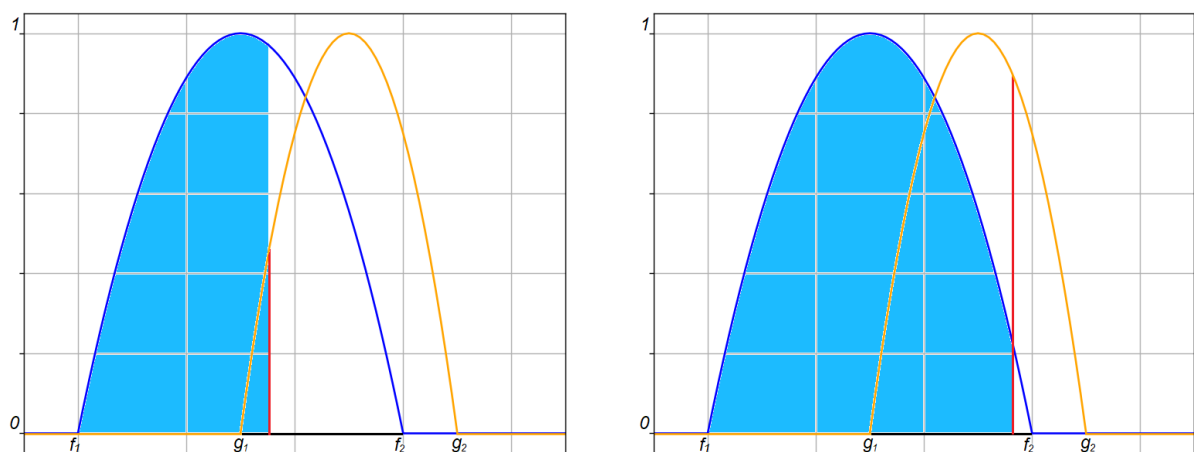


Рисунок 2 - Інтервал dx і області-підмножини f , в яких $x_1 \leq x_2$

У цьому інтервалі кількість точок дорівнює $g(x)dx$, кількість точок, що задовольняють умові $x_1 \leq x_2$ дорівнює $\int_{f_1}^x f(y)dy$.

Таким чином, кількість пар точок для даного інтервалу становить

$$n_{dx} = g(x)dx * \int_{f_1}^x f(y)dy \quad (1)$$

Тож, для всіх можливих інтервалів dx кількість пар точок становить відповідно

$$n_c = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) \left[\int_{f_1}^x f(y)dy \right] dx = \int_{g_1}^{g_2} g(x) \left[\int_{f_1}^x f(y)dy \right] dx \quad (2)$$

Загальна кількість n_1 точок, обмежених функцією $f(x)$, становить

$$n_1 = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = \int_{f_1}^{f_2} f(x)dx \quad (3)$$

Так само, для $g(x)$ ця кількість n_2 становить

$$n_2 = \int_{-\infty}^{\infty} g(x)dx = \int_{g_1}^{g_2} g(x)dx \quad (4)$$

Відповідно, кількість можливих пар, з яких одна випадково, рівно імовірно обирається із множини, яка відсікається $f(x)$, а друга – з $g(x)$, складає

$$n_1 n_2 = \int_{f_1}^{f_2} f(x)dx * \int_{g_1}^{g_2} g(x)dx \quad (5)$$

Таким чином, шукана імовірність має вигляд:

$$P(f < g) = \frac{n_c}{n_1 n_2} = \frac{\int_{g_1}^{g_2} g(x) \left[\int_{f_1}^x f(y)dy \right] dx}{\int_{f_1}^{f_2} f(x)dx * \int_{g_1}^{g_2} g(x)dx} \quad (6)$$

Властивості запропонованого відношення

Розглянемо деякі властивості цього відношення.

1. Рефлексивність. У контексті рефлексивності відношення доцільно розглянути два випадки. Перший стосується встановлення відношення між одним і тим же значенням, тобто як реальне значення, так і функція приналежності є однаковими. В такому випадку, очевидно, що відношення виконується за означенням, оскільки $P(a \geq a) = 1 \geq \beta$. Другий випадок стосується двох нечітких чисел, для яких функції приналежності однакові, але реальні значення можуть відрізнятись. Цей випадок зводиться до вибору двох рівномірно розподілених випадкових чисел на одному інтервалі, і одне з них більше за інше в половині випадків, тобто, імовірність дорівнює 0,5. З формального означення так само випливає:

$$\begin{aligned}
 P(f \geq f) &= \frac{\int_{f_1}^{f_2} f(x) \cdot \left[\int_{f_1}^x f(y) dy \right] dx}{\int_{f_1}^{f_2} f(x) dx \cdot \int_{f_1}^{f_2} f(x) dx} = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f(x) \cdot [F(x) - F(f_1)] dx}{(F(f_2) - F(f_1))^2} = \\
 &= \frac{\int_{f_1}^{f_2} f(x) \cdot F(x) dx}{(F(f_2) - F(f_1))^2} - \frac{F(f_1) \int_{f_1}^{f_2} f(x) dx}{(F(f_2) - F(f_1))^2} = \\
 \int_{f_1}^{f_2} f(x) \cdot F(x) dx &= \left[\begin{array}{ll} u = F(x) & du = f(x) dx \\ dv = f(x) dx & v = F(x) \end{array} \right] = \\
 &= F^2(x) \Big|_{f_1}^{f_2} - \int_{f_1}^{f_2} f(x) \cdot F(x) dx \\
 2 \int_{f_1}^{f_2} f(x) \cdot F(x) dx &= F^2(x) \Big|_{f_1}^{f_2} \Rightarrow \int_{f_1}^{f_2} f(x) \cdot F(x) dx = \frac{F^2(x) \Big|_{f_1}^{f_2}}{2} = \\
 &= \frac{F^2(f_2) - F^2(f_1)}{2} = \frac{(F(f_2) - F(f_1))(F(f_2) + F(f_1))}{2}
 \end{aligned}$$

Тоді,

$$\begin{aligned}
 P(f \geq f) &= \frac{(F(f_2) - F(f_1))(F(f_2) + F(f_1))}{2(F(f_2) - F(f_1))^2} - \frac{F(f_1)(F(f_2) - F(f_1))}{(F(f_2) - F(f_1))^2} = \\
 &= \frac{(F(f_2) + F(f_1))}{2(F(f_2) - F(f_1))} - \frac{F(f_1)}{F(f_2) - F(f_1)} = \frac{F(f_2) + F(f_1) - 2F(f_1)}{2(F(f_2) - F(f_1))} = \\
 &= \frac{F(f_2) - F(f_1)}{2(F(f_2) - F(f_1))} = \frac{1}{2}.
 \end{aligned}$$

Отже, відношення рефлексивне при $\beta = \frac{1}{2}$.

2. Симетричність. За означенням відношення, $f \geq_\beta g \Leftrightarrow P(f \geq g) \geq \beta$.

Відповідно, $P(f \geq g) = 1 - \beta \Leftrightarrow f \geq_{1-\beta} g$. Таким чином, відношення симетричне при $\beta = 1 - \beta \Rightarrow \beta = \frac{1}{2}$.

3. Інваріантність до горизонтального зміщення. Геометричний зміст відношення полягає у відношенні площ, обмежених кривими функцій приналежності, і не залежить від вибору початку координат. Тобто, з формального означення:

$$P(f \geq g) = \frac{\int_{f_1}^{f_2} f(x) \cdot \left[\int_{g_1}^x g(y) dy \right] dx}{\int_{f_1}^{f_2} f(x) dx \cdot \int_{g_1}^{g_2} g(x) dx} = \left[\begin{array}{lll} t = x + d & x_1 = f_1 & t_1 = f_1 - d \\ dx = dt & x_2 = f_2 & t_2 = f_2 - d \\ x = t - d & x_3 = g_1 & t_3 = g_1 - d \\ & x_4 = g_2 & t_4 = g_2 - d \end{array} \right] =$$

$$= \frac{\int_{f_1-d}^{f_2-d} f(t-d) \cdot \left[\int_{g_1-d}^{t-d} g(y) dy \right] dt}{\int_{f_1-d}^{f_2-d} f(t-d) dt \cdot \int_{g_1-d}^{g_2-d} g(t-d) dt}$$

Практично важливим для обчислення є значення $d = \min(x | x \in \text{supp}(f) \cup \text{supp}(g))$.

4. Послаблення. Якщо $\dot{a} \geq_{\beta_1} \dot{b}$, то $\forall \beta_2 \in [0; \beta_1]: \dot{a} \geq_{\beta_2} \dot{b}$.

Приклад застосування методу і порівняння з відомими підходами

Розглянемо застосування методу та його порівняння з відомими підходами. Для цього розглянемо пару трикутних чисел $f = (1, 4, 10)$ та $g = (3, 7, 9)$ (рис. 3). Для них відповідно

$$f(x) = \begin{cases} \frac{x}{3} - \frac{1}{3}, x \in [1, 4] \\ -\frac{x}{6} + \frac{5}{3}, x \in [4, 10] \\ 0, \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

$$g(x) = \begin{cases} \frac{x}{4} - \frac{3}{4}, x \in [3, 7] \\ -\frac{x}{2} + \frac{9}{2}, x \in [7, 9] \\ 0, \text{в іншому випадку} \end{cases}$$

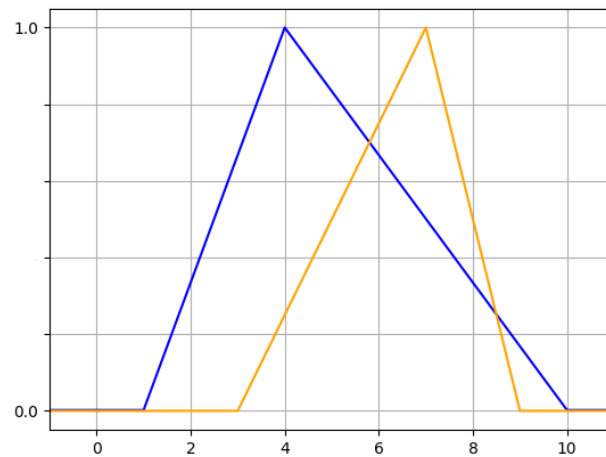


Рисунок 3 - Числа $f = (1, 4, 10)$ та $g = (3, 7, 9)$

Для них (використовуючи формулу площі трикутника)

$$n_1 = \int_1^{10} f(x) dx = \frac{1}{2} \cdot 9 = \frac{9}{2}, n_2 = \int_3^9 g(x) dx = \frac{1}{2} \cdot 6 = 3.$$

Враховуючи будову $f(x)$ та $g(x)$, доцільно представити n_c як:

$$n_c = \int_3^4 g(x) \left[\int_1^x f(y) dy \right] dx + \int_4^7 g(x) \left[\int_1^x f(y) dy \right] dx + \int_7^9 g(x) \left[\int_1^x f(y) dy \right] dx$$

$$= \frac{1873}{192}$$

Отже, $P(f \geq g) = \frac{1873}{192} * \frac{2}{9*3} = \frac{1873}{2592} \approx 0.72$, звідси $f <_{0.72} g$.

Результат порівняння чисел f і g за іншими відомими методами наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняння чисел f і g за різними методами

Метод	Результат порівняння
Метод Адамо($\alpha = 0.5$)	$f < g$
Метод Адамо($\alpha = 1$)	$f < g$
Метод Ягера (значимість $g(x)=x$)	$f < g$
Метод Ченга	$f > g$
Метод Ліу-Ванга ($\lambda = 0.5$)	$f < g$
Запропонований метод	$f <_{0.72} g$

Аналіз табл. 1 дає змогу зробити висновок про коректність запропонованого методу.

Алгоритмічна реалізація операторів порівняння нечітких чисел

Для застосування запропонованого методу порівняння нечітких чисел у програмному забезпеченні необхідна його реалізація як логічного оператора або функції, яка виконує відповідні операції.

Операційна семантика оператора “менше” для нечітких чисел наведена на рис. 4 у вигляді діаграми станів. Слід зазначити, що для більш ефективного обчислення відношення між нечіткими числами, їхні значення n_i доцільно зберігати у “лінійному” кеші (значення обчислюється лише за потреби та зберігається). Значення n_c , n_1 , n_2 обчислюються за формулами (3)-(5).

Операційна семантика оператора “більше” має аналогічний вигляд, за виключенням блоку обчислення результату, де розгалуження має зворотні умови.

Так само, для оператора “дорівнює” відмінність полягає в умові блоку обчислення результату, де вона буде $1 - < \frac{n_c}{n_1 n_2} < \beta$.

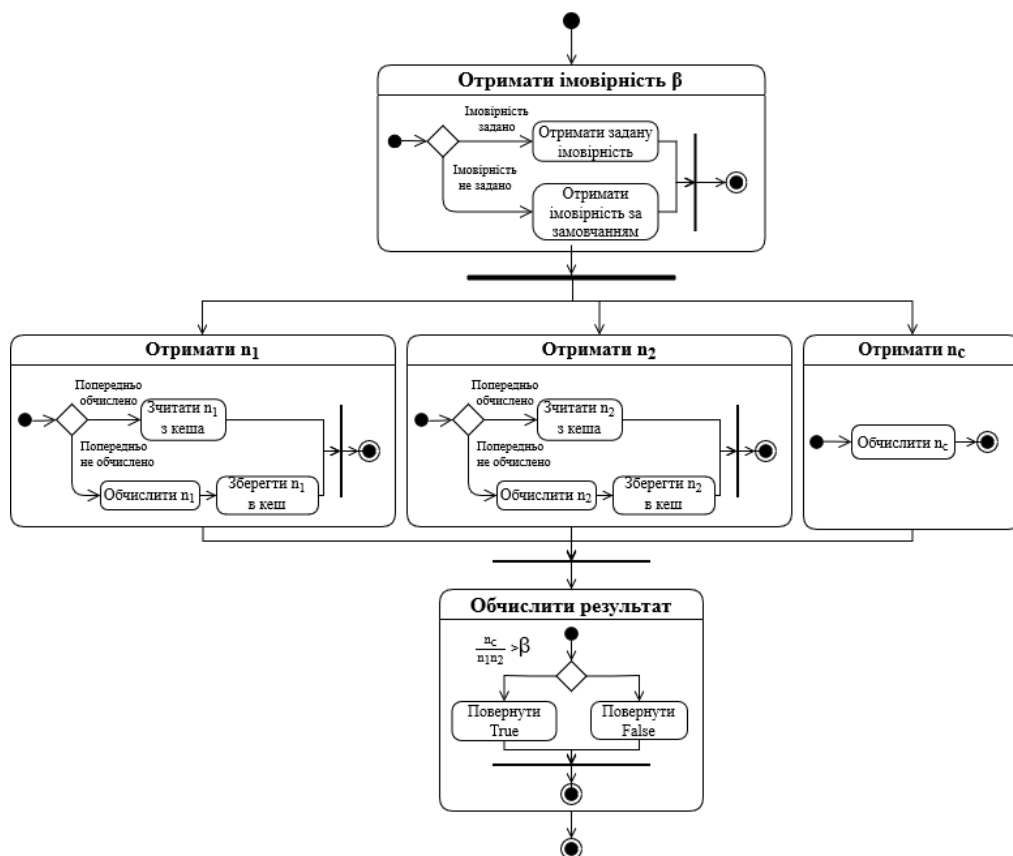


Рисунок 4 - Операційна семантика нечіткого оператора “менше”

Висновки. Запропонований метод імовірнісного порівняння нечітких значень базується на застосуванні можливих реальних значень відповідних нечітких чисел. Обчислення імовірності, яка визначає відношення, наведене у загальному вигляді для довільних функцій приналежності нечітких чисел $f(x)$ та $g(x)$, втім розглянутий приклад застосування для трикутних чисел показує, що вигляд функції сильно впливає на процес обчислення.

Ефективність обчислення імовірності у конкретному випадку можна значно підвищити шляхом використання особливості відповідної функції приналежності, кешування (наприклад, збереження “лінивого” значення $\int_{f_1}^{f_2} f(x)dx$) та властивості відношення.

Використання запропонованого відношення планується в комплексі із певним способом представлення нечітких чисел для застосування в алгебраїчній системі агрегатів при створенні програмного забезпечення систем цифрових двійників, у тому числі за набором темпоральних мультимодальних даних із невизначеністю з можливістю налаштування довірчої імовірності β .

ЛІТЕРАТУРА

1. Cai Y. et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing //Procedia manufacturing. – 2017. – Т. 10. – С. 1031-1042.
2. Сулема Є. С. Методи, моделі та засоби обробки мультимодальних даних цифрових двійників досліджуваних об'єктів. – 2020.
3. Dijkman J. G., Van Haeringen H., De Lange S. J. Fuzzy numbers //Journal of mathematical analysis and applications. – 1983. – Т. 92. – №. 2. – С. 301-341.
4. Stefanini L. et al. Fuzzy numbers and fuzzy arithmetic //Handbook of granular computing. – 2008. – Т. 12. – С. 249-284.
5. Ramik J. et al. Inequality relation between fuzzy numbers and its use in fuzzy optimization //Fuzzy sets and systems. – 1985. – Т. 16. – №. 2. – С. 123-138.
6. De Runz C. et al. A new Method for the Comparison of two fuzzy numbers extending Fuzzy Max Order //Information Processing and Managment of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. – Éditions EDK, 2006. – С. 127--133.
7. Wang X., Kerre E. E. Reasonable properties for the ordering of fuzzy quantities (I) //Fuzzy sets and systems. – 2001. – Т. 118. – №. 3. – С. 375-385.
8. Thelen A. et al. A comprehensive review of digital twin—part 2: roles of uncertainty quantification and optimization, a battery digital twin, and perspectives //Structural and multidisciplinary optimization. – 2023. – Т. 66. – №. 1. – С. 1.
9. Rios J. et al. Uncertainty of data and the digital twin: a review //International Journal of Product Lifecycle Management. – 2020. – Т. 12. – №. 4. – С. 329-358.
10. Ruan D. (ed.). Fuzzy logic foundations and industrial applications. – Springer Science & Business Media, 2012. – Т. 8.
11. Adamo J. M. Fuzzy decision trees //Fuzzy sets and systems. – 1980. – Т. 4. – №. 3. – С. 207-219.
12. Yager R. R. A procedure for ordering fuzzy subsets of the unit interval //Information sciences. – 1981. – Т. 24. – №. 2. – С. 143-161.
13. Chang W. Ranking of fuzzy utilities with triangular membership functions //Proceedings of International Conference on Policy Analysis and Systems. – 1981. – Т. 272.
14. de Campos Ibanez L. M., Munoz A. G. A subjective approach for ranking fuzzy numbers //Fuzzy sets and systems. – 1989. – Т. 29. – №. 2. – С. 145-153
15. Jain R. A procedure for multiple-aspect decision making using fuzzy sets //International Journal of systems science. – 1977. – Т. 8. – №. 1. – С. 1-7.
16. Kerre E. E. The use of fuzzy set theory in electrocardiological diagnostics //Approximate reasoning in decision analysis. – 1982. – Т. 20. – С. 277-282.

REFERENCES

1. Cai Y. et al. Sensor data and information fusion to construct digital-twins virtual machine tools for cyber-physical manufacturing //Procedia manufacturing. – 2017. – Т. 10. – С. 1031-1042.
2. Sulema Ye. S. Methods, models, and means of researched objects digital twins multimodal data processing. – 2020.

3. Dijkman J. G., Van Haeringen H., De Lange S. J. Fuzzy numbers //Journal of mathematical analysis and applications. – 1983. – Т. 92. – №. 2. – С. 301-341.
4. Stefanini L. et al. Fuzzy numbers and fuzzy arithmetic //Handbook of granular computing. – 2008. – Т. 12. – С. 249-284.
5. Ramik J. et al. Inequality relation between fuzzy numbers and its use in fuzzy optimization //Fuzzy sets and systems. – 1985. – Т. 16. – №. 2. – С. 123-138.
6. De Runz C. et al. A new Method for the Comparison of two fuzzy numbers extending Fuzzy Max Order //Information Processing and Managment of Uncertainty in Knowledge-Based Systems. – Éditions EDK, 2006. – С. 127--133.
7. Wang X., Kerre E. E. Reasonable properties for the ordering of fuzzy quantities (I) //Fuzzy sets and systems. – 2001. – Т. 118. – №. 3. – С. 375-385.
8. Thelen A. et al. A comprehensive review of digital twin—part 2: roles of uncertainty quantification and optimization, a battery digital twin, and perspectives //Structural and multidisciplinary optimization. – 2023. – Т. 66. – №. 1. – С. 1.
9. Rios J. et al. Uncertainty of data and the digital twin: a review //International Journal of Product Lifecycle Management. – 2020. – Т. 12. – №. 4. – С. 329-358.
10. Ruan D. (ed.). Fuzzy logic foundations and industrial applications. – Springer Science & Business Media, 2012. – Т. 8.
11. Adamo J. M. Fuzzy decision trees //Fuzzy sets and systems. – 1980. – Т. 4. – №. 3. – С. 207-219.
12. Yager R. R. A procedure for ordering fuzzy subsets of the unit interval //Information sciences. – 1981. – Т. 24. – №. 2. – С. 143-161.
13. Chang W. Ranking of fuzzy utilities with triangular membership functions //Proceedings of International Conference on Policy Analysis and Systems. – 1981. – Т. 272.
14. de Campos Ibanez L. M., Munoz A. G. A subjective approach for ranking fuzzy numbers //Fuzzy sets and systems. – 1989. – Т. 29. – №. 2. – С. 145-153
15. Jain R. A procedure for multiple-aspect decision making using fuzzy sets //International Journal of systems science. – 1977. – Т. 8. – №. 1. – С. 1-7.
16. Kerre E. E. The use of fuzzy set theory in electrocardiological diagnostics //Approximate reasoning in decision analysis. – 1982. – Т. 20. – С. 277-282.

Received 10.02.2025.
Accepted 17.02.2025.

Probabilistic method of fuzzy number comparison

The subject of fuzzy numbers comparison is not very prevalent in modern research. A number of older publications propose a number of well-known methods that broadly fall into one of three classes. First is index-based comparison, which maps fuzzy numbers into a real value and ranks them accordingly, such as Adamo, Yager, Chang, Liu and Wang, etc. Secondly, there are methods that propose fuzzy number ranking based on distance (e.g. Hamming distance) from certain reference sets, such as Kerre and Jain. Third category is rare and proposes a specific pair-wise ranking approach in particular circumstances. New methods are being proposed, but this is not a frequent occurrence.

Thus, a new method of fuzzy numbers comparison is proposed that takes into account a confidence probability of a comparison. In the paper a generalized method for computing ordering relation between fuzzy numbers regardless of the specifics of membership function is provided. An example of its usage is considered for triangular fuzzy numbers that is one of the most common ways of expressing uncertainty. The results are also compared to some of the existing methods. Formal properties of the relation, based on the proposed comparison method are discussed and proven. The operational semantics of a logical operator or a function that implements the new method in software is considered for the “less than” operator and described with a state diagram. Other relations, such as “greater than” and “equals” are also discussed.

Research materials provide some insights into certain properties of the proposed method and particular hurdles when implementing it in software systems, such as using smooth analytically defined membership function and caching certain intermediate computation results.

Пеня Олександр Романович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського.

Сулема Євгенія Станіславівна – д.т.н., доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем Київського політехнічного інституту ім. Ігоря Сікорського.

Oleksandr Penia – Post-Graduate Student of Computer Systems Software Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

Yevgeniya Sulema – DSc, Associate Professor, Head of the Computer Systems Software Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

В.Ю. Песчанський, Є.С. Сулема

АРХІТЕКТУРНІ ПРИНЦИПИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВЕРИФІКАЦІЇ ТА ЯКОСТІ СИСТЕМИ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ МЕДИКО-БІОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Анотація. У статті розглядаються архітектурні принципи забезпечення верифікації та якості систем створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів. Особливу увагу приділено питанням модульності та ізоляції компонентів, що дозволяє покращити тестування та спрощує виявлення помилок. Описано використання автоматизації тестування для швидкої верифікації змін у системі, зокрема через використання контейнерів Docker для ізоляції середовищ розробки, тестування та продакшн-середовищ. Розглянуто мікросервісну архітектуру, яка сприяє незалежному тестуванню та розгортанню компонентів системи. Окрім цього, висвітлено методології тестування на основі моделі, інтеграційного тестування та тестування в реальному часі. Представлено огляд інструментів для тестування, таких як системи безперервної інтеграції та доставки (CI/CD), фреймворки для тестування та системи моніторингу та логування. Додатково розглянуто архітектурні рішення для забезпечення точності та достовірності даних, що використовуються системою. Практичні приклади включають тестування цифрового двійника гортані людини з використанням запропонованих підходів та інструментів, а також аналіз результатів верифікації системи.

Ключові слова: інженерія програмного забезпечення, архітектура програмного забезпечення, автоматизація тестування, верифікація, модульність, контейнеризація, цифрові двійники, медико-біологічні об'єкти.

Постановка проблеми. Цифровізація охорони здоров'я є одним із ключових напрямків розвитку медичної галузі, що сприяє підвищенню ефективності медичних досліджень, діагностики та лікування. Впровадження цифрових двійників медико-біологічних об'єктів, таких як гортань людини, є важливим кроком у цьому напрямку. Цифрові двійники дозволяють відтворювати фізіологічні та функціональні характеристики реальних об'єктів, що відкриває нові можливості для їх дослідження та моделювання в умовах, близьких до реальних. Однак, створення та впровадження таких систем супроводжується низкою значних викликів.

Основна проблема полягає в забезпеченні якості та верифікації розроблюваних систем. Цифрові двійники складаються з численних компонентів, кожен з яких виконує певні функції та вимагає ретельного тестування [1-2]. Забезпечення високої якості та достовірності даних є критично важливим для таких систем, оскільки навіть незначні

помилки можуть призвести до неправдивих результатів досліджень або некоректних медичних рішень.

Однією з основних складностей є модульність та ізоляція компонентів. Сучасні системи мають бути розподіленими та складатися з окремих модулів, які працюють незалежно один від одного. Це ускладнює процес тестування, оскільки кожен модуль повинен бути ретельно перевірений на сумісність з іншими модулями та на здатність функціонувати автономно.

Іншим важливим аспектом є автоматизація тестування. В умовах постійного оновлення та вдосконалення систем, ручне тестування стає неефективним та занадто трудомістким. Використання автоматизованих тестів дозволяє значно пришвидшити процес верифікації змін у системі, забезпечуючи при цьому високу точність та повторюваність результатів.

Крім того, важливим є питання контейнеризації та використання мікросервісної архітектури. Контейнеризація дозволяє ізолювати середовища розроблення та тестування, що підвищує гнучкість системи та полегшує процес тестування [3]. Мікросервісна архітектура, в свою чергу, забезпечує незалежне тестування та розгортання компонентів системи, що дозволяє швидко виявляти та усувати помилки.

Методології тестування, такі як тестування на основі моделі, інтеграційне тестування та тестування в реальному часі, також є важливими для забезпечення якості системи. Використання моделей для створення тестових сценаріїв дозволяє перевірити відповідність системи вимогам, а інтеграційне тестування допомагає виявляти проблеми у взаємодії між модулями. Тестування в реальному часі, з використанням відповідних інструментів, забезпечує перевірку роботи системи в умовах, максимально наближених до реальних.

На додаток до цього, важливою є інтеграція систем безперервної інтеграції та доставки (CI/CD) [4], фреймворків для тестування, а також систем моніторингу та логування. Ці інструменти дозволяють автоматизувати процес тестування та розгортання, а також забезпечують постійний моніторинг роботи системи та виявлення проблем на ранніх стадіях.

Таким чином, створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів вимагає комплексного підходу до забезпечення якості та верифікації, включаючи модульність, автоматизацію тестування, контейнеризацію, мікросервісну архітектуру та використання сучасних інструментів для тестування та моніторингу. Тільки за умови дотримання всіх цих аспектів можна забезпечити високу якість та надійність розроблюваних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасній науково-технічній літературі активно досліджуються різні аспекти розроблення та впровадження цифрових двійників у медико-біологічних системах. Багато досліджень присвячено створенню та використанню спеціалізованих медичних інформаційних та експертних систем, які значно полегшують діагностику та лікування пацієнтів. Наприклад, програмні продукти, такі як ASDSee, Aquilion ONE, Infinix CS-I, Horizon SE, XIDF-QCA801, широко використовуються в комплексах променевої та ультразвукової діагностики. Вони дозволяють проводити ультразвукову сонографію, комп'ютерну томографію, магнітно-

резонансну томографію, ангиографію, ехасонографію та ендоскопію, забезпечуючи високу точність діагностичних даних [5-6].

Діагностичні системи також активно використовують експертні системи, такі як Гастрограф 1Т, Stimul та інші. Ці системи дозволяють автоматизувати процеси отримання та аналізу діагностичних даних, що значно підвищує ефективність медичних обстежень. Для проведення діагностичних тестів і встановлення діагнозу використовуються експертні системи, наприклад, Internist, BPLab, SpeseLabs Medical, Meditech, Omron, CardioVita тощо [7].

В рамках міжнародного співробітництва створено ряд експертних систем і баз даних, таких як NUCLEUS (мультимедійне досьє пацієнта), EMDIS (Європейська медична інформаційна система для донорів кісткового мозку), EPIC (Європейська модель лікування) та FEST (база для європейських служб телемедицини). Ці системи сприяють обміну медичною інформацією на міжнародному рівні, забезпечуючи більш ефективне та швидке надання медичних послуг [8-9].

На території України також активно використовуються різні медичні інформаційні системи (МІС), такі як «ЕМСІМЕД», «Медучет», «Медіалог», «TherDep», «Astraia», «ЛисМедап», «Каштан», «Доктор Елекс», «Добробут» та інші. Більшість з них є комерційним програмним забезпеченням, однак паралельно з ринком комерційного ПЗ активно розвивається застосування вільно-розповсюджуваного ПЗ з відкритим кодом, таких як WorldVista, OpenEMR та OpenMRS [10-11].

Важливим аспектом є розвиток мобільних застосунків у системі охорони здоров'я (m-health), які підсилюють взаємодію між пацієнтами та лікарями. Наприклад, мобільний застосунок Easaalux, розроблений в рамках проєкту ЄС, дозволяє здійснювати моніторинг стану здоров'я літніх людей з хронічними захворюваннями, забезпечуючи оперативну взаємодію пацієнтів, опікунів і лікарів [12].

Таким чином, аналіз останніх досліджень та програмних продуктів свідчить про значний прогрес у розвитку медичних інформаційних систем і технологій, що забезпечують більш точну діагностику, покращення якості медичного обслуговування та підвищення ефективності лікування пацієнтів. Проте, існує потреба в подальшому вдосконаленні цих систем, особливо в аспекті їх інтеграції та автоматизації, що сприятиме підвищенню якості медичних послуг на всіх рівнях.

Виклад основного матеріалу дослідження. Основною метою дослідження є розроблення архітектурних принципів, які забезпечують високу якість створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів. Цифрові двійники дозволяють точно відтворювати фізіологічні та функціональні характеристики реальних об'єктів, що відкриває нові можливості для їх дослідження та моделювання в умовах, наближених до реальних. Для досягнення цієї мети важливо забезпечити високу точність і достовірність даних, використовуваних у системі.

У рамках дослідження розроблено архітектуру програмної системи для створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів, зокрема гортані людини.

Система забезпечує стандартизацію та уніфікацію процесів збору даних з різних джерел, включаючи відео, аудіо та інші медичні дані. Це дозволяє конвертувати різноманітні дані у єдиний системний формат, що значно полегшує подальший аналіз та

обробку. Завдяки цьому лікарі можуть отримувати комплексну та узгоджену інформацію про стан пацієнта, що підвищує точність діагностування та ефективність лікування. Використання єдиного системного формату також дозволяє інтегрувати різні типи даних у єдину інформаційну систему, забезпечуючи їхню сумісність та взаємодію.

Створення індивідуальних облікових записів для кожного пацієнта забезпечує зберігання всіх медичних даних та результатів обстежень. На основі цих даних автоматично формується цифровий двійник гортані, який точно відображає фізіологічні та функціональні характеристики пацієнта. Це дозволяє лікарям моделювати різні сценарії лікування та прогнозувати результати, що сприяє прийняттю обґрунтованих медичних рішень.

Безперервне оновлення цифрового двійника в режимі реального часу дозволяє оперативно реагувати на зміни у стані пацієнта. Медичний персонал має доступ до актуальної інформації про пацієнта, що значно підвищує ефективність медичного обслуговування. Це особливо важливо в умовах інтенсивної терапії та моніторингу критичних станів, де кожна секунда має значення. Формування потоків даних у сесію для кожного окремого користувача дозволяє зберігати контекстну інформацію та забезпечувати актуальність даних. Приблизну структуру даних можна побачити на рис 1.

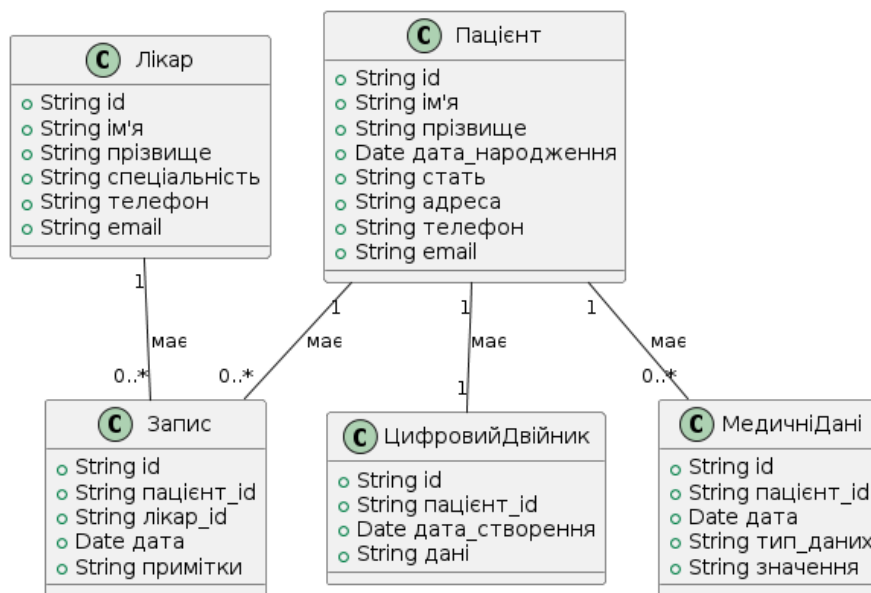


Рисунок 1 - Пропонований шаблон бази для збереження даних

Сучасні методи автоматизації тестування дозволяють швидко виявляти та виправляти помилки. Завдяки впровадженню систем безперервної інтеграції та доставки (CI/CD), забезпечується висока надійність та стабільність роботи програмного забезпечення. Це дозволяє лікарям та медичному персоналу зосередитися на лікуванні пацієнтів, не витрачаючи час на технічні аспекти. Автоматизація тестування включає використання метрик якості програмного забезпечення, таких як покриття тестами, що дозволяє забезпечити високу якість та надійність програмного забезпечення [13].

Реалізація системи з урахуванням найвищих стандартів безпеки забезпечує конфіденційність та захист персональних даних пацієнтів. Використання методів шифрування та багаторівневої аутентифікації гарантує, що доступ до даних мають лише

уповноважені особи. Регулярні аудити безпеки та виявлення можливих загроз допомагають підтримувати високий рівень захисту даних. Архітектура системи базується на принципах розподіленості, анонімізації та володіння даними, що забезпечує захист інформації навіть у разі компрометації окремих компонентів системи.

Принцип анонімізації в системі створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів спрямований на захист конфіденційності пацієнтів шляхом запобігання можливості ідентифікації осіб на основі збережених даних. Анонімізація реалізується через псевдонімізацію, коли особисті дані замінюються на штучні ідентифікатори, що дозволяє використовувати медичні дані без розкриття особистості пацієнтів. Дані пацієнтів зберігаються у розподіленій системі зберігання, де різні фрагменти інформації зберігаються в різних підсистемах. Це означає, що навіть у разі компрометації однієї підсистеми, зловмисник не зможе зібрати всі необхідні дані для ідентифікації пацієнта.

Система також використовує шифрування для захисту даних при передачі між компонентами, що гарантує, що навіть при перехопленні даних вони залишаться недоступними без відповідного ключа дешифрування. Аудит доступу та логування дій користувачів допомагає відстежувати та контролювати доступ до даних, забезпечуючи додатковий рівень захисту. Це комплексне поєднання методів забезпечує високий рівень конфіденційності та захисту особистих даних пацієнтів у системі створення цифрових двійників.

Інтуїтивно зрозумілі інтерфейси для візуалізації цифрових двійників та проведення детального аналізу медичних даних значно покращують якість медичного обслуговування. Інтерактивні інструменти дозволяють лікарям досліджувати різні аспекти стану пацієнта та приймати обґрунтовані рішення щодо лікування. Візуалізація даних також включає використання графічних моделей та інтерактивних панелей управління, що дозволяє швидко отримувати доступ до необхідної інформації.

Діаграма активності пропонуваної системи наведена на рис 2.

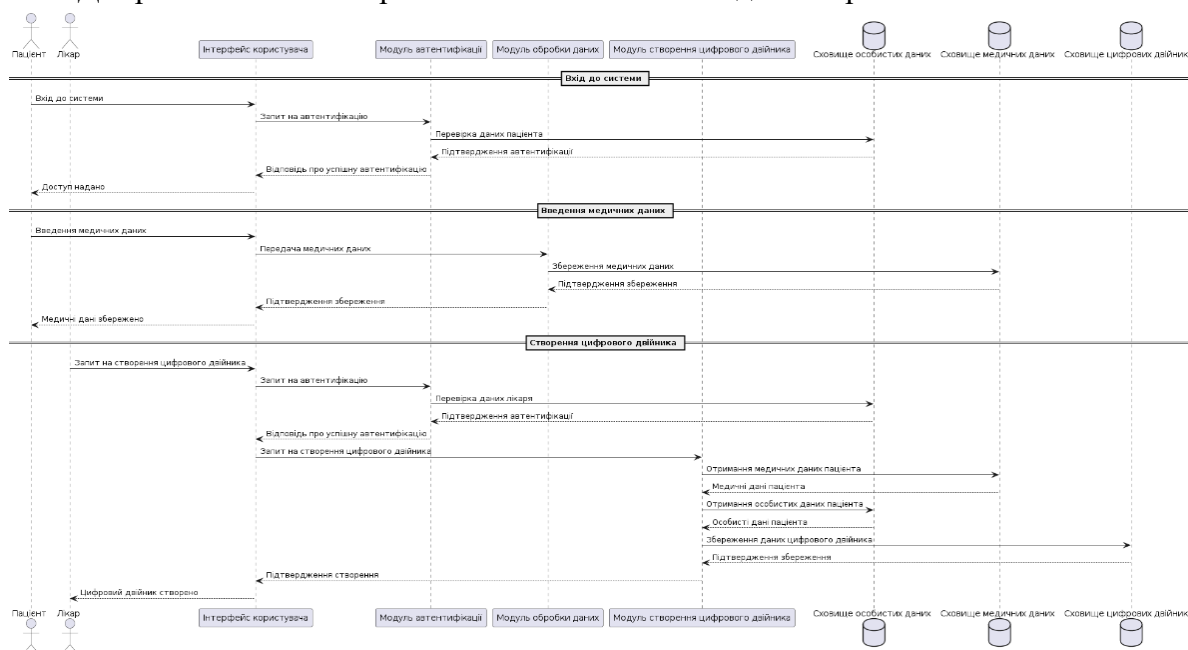


Рисунок 2 - Діаграма активності пропонуваної системи

Розглянемо взаємодію користувачів системи. У системі взаємодіють пацієнти, лікарі та адміністратори.

Пацієнти, лікарі та адміністратори входять до системи, використовуючи свої облікові дані. Автентифікація здійснюється через модуль автентифікації, який перевіряє дані користувачів і надає доступ до системи. Після успішного входу пацієнти та лікарі можуть вводити або завантажувати медичні дані через інтерфейс користувача, які потім зберігаються в базі даних медичних даних.

Лікарі мають можливість створювати цифрові двійники пацієнтів. Для цього вони використовують інтерфейс користувача, який взаємодіє з модулем створення цифрового двійника та сторонніми пристроями.

Пацієнти та лікарі можуть також переглядати цифрові двійники. Вони надсилають запит на візуалізацію через інтерфейс користувача, який передається модулю візуалізації цифрового двійника. Модуль візуалізації отримує дані цифрового двійника з бази даних і відображає їх користувачеві.

Адміністратори відповідають за управління системою, включаючи налаштування прав доступу для користувачів та конфігурацію системних параметрів. Вони використовують інтерфейс користувача для виконання цих завдань, забезпечуючи безперебійну роботу системи.

Сторонні пристрої, такі як медичні прилади, автоматично передають зібрані дані до модуля обробки даних. Модуль обробки даних зберігає ці дані в базі даних медичних даних, забезпечуючи їх доступність для подальшого використання у створенні та візуалізації цифрових двійників.

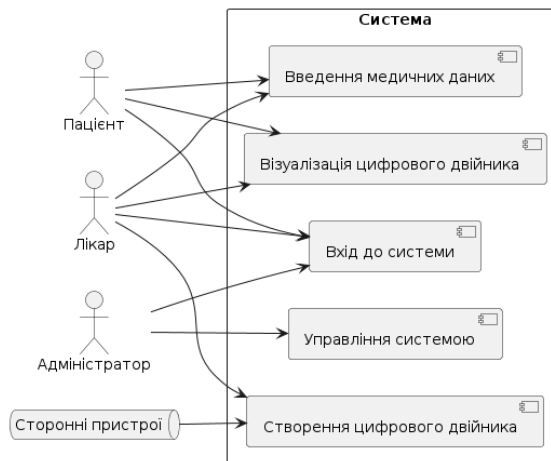


Рисунок 3 - Діаграма використання пропонованої системи

Архітектура розроблюваної системи, наведена на рис. 4, є базовою та містить узагальнений набір компонентів, що дозволяє адаптувати її до потреб медичного закладу. Її структура забезпечує модульність та ізоляцію кожного компонента, що спрощує процес інтеграції та налаштування системи під специфічні вимоги різних установ.

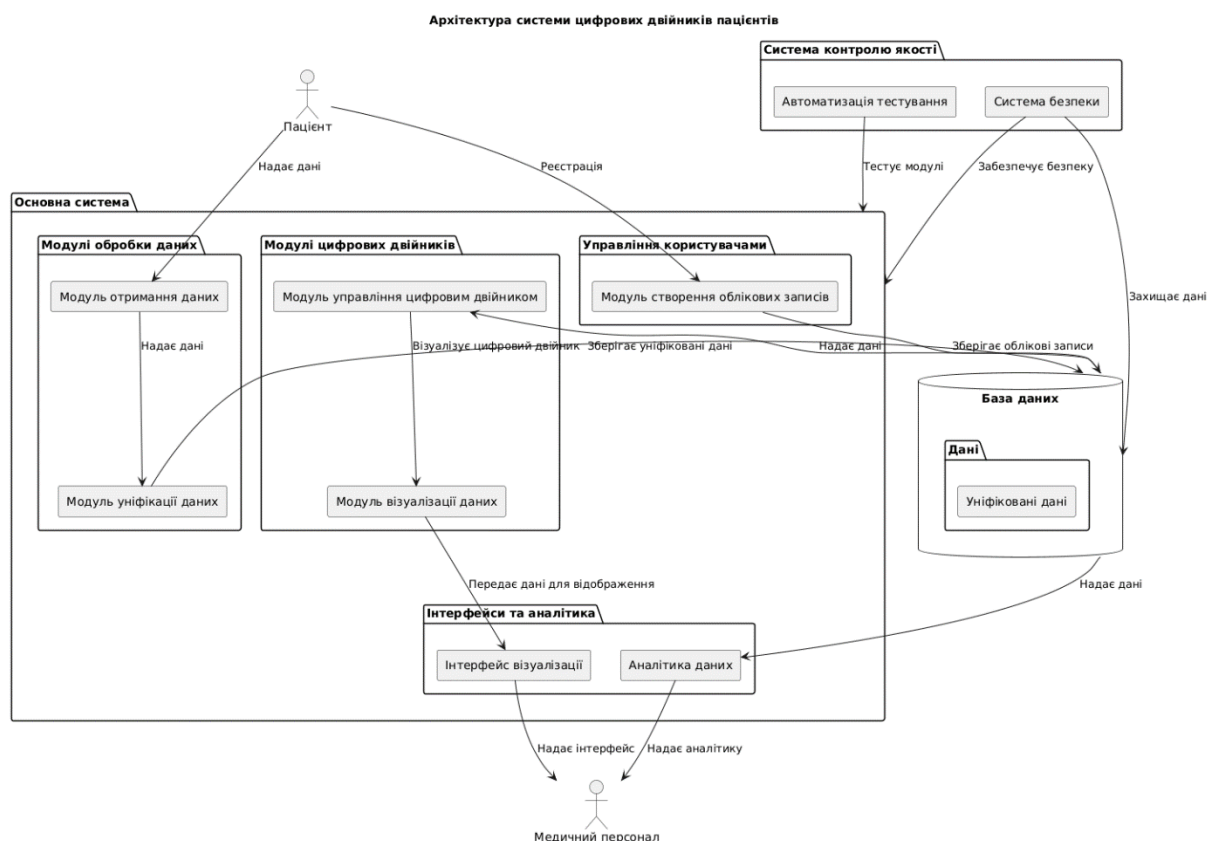


Рисунок 4 - Архітектура розроблюваної системи

Використання запропонованої базової архітектури спрощує процес розроблення програмного забезпечення для медичної галузі.

Висновки. Запропонована архітектура програмної системи забезпечує ефективну верифікацію та високу якість створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів. Використання модульності та ізоляції компонентів дозволяє значно полегшити тестування та виявлення помилок, а автоматизація тестування сприяє швидкій верифікації змін у системі. Контейнеризація та мікросервісна архітектура забезпечують незалежне тестування та розгортання компонентів, що підвищує гнучкість та надійність системи. Використання сучасних методологій тестування, таких як тестування на основі моделі, інтеграційне тестування та тестування в реальному часі, дозволяє ретельно перевіряти відповідність системи вимогам та виявляти проблеми у взаємодії між модулями. Інструменти для автоматизації тестування, моніторингу та логування забезпечують постійний контроль за роботою системи та виявлення проблем на ранніх стадіях. Забезпечення якості даних є критично важливим аспектом, що досягається через валідацію та перевірку даних, а також використання надійних систем управління даними. Практичне застосування запропонованих підходів та інструментів демонструє їх ефективність на прикладі тестування цифрового двійника гортані, що сприяє підвищенню якості організації медичного обслуговування та посилює захист медичних даних пацієнтів.

ЛІТЕРАТУРА

1. Lombardo, A., Morabito, G., Quattropiani, S. and Ricci, C., 2022, June. Design, implementation, and testing of a microservices-based Digital Twins framework for network management and control. In *2022 IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM)* (pp. 590-595). IEEE
2. Rolle, R.P., Martucci, V.D.O. and Godoy, E.P., 2021. Modular framework for digital twins: Development and performance analysis. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 32(6), pp.1485-1497.
3. Dobaj, J., Riel, A., Krug, T., Seidl, M., Macher, G. and Egretzberger, M., 2022, May. Towards digital twin-enabled DevOps for CPS providing architecture-based service adaptation & verification at runtime. In *Proceedings of the 17th Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems* (pp. 132-143).
4. Söylemez, M., Tekinerdogan, B. and Kolukisa Tarhan, A., 2022. Challenges and solution directions of microservice architectures: A systematic literature review. *Applied sciences*, 12(11), p.5507.
5. Sun, T., He, X., Song, X., Shu, L. and Li, Z., 2022. The digital twin in medicine: a key to the future of healthcare? *Frontiers in Medicine*, 9, p.907066.
6. Currie, G.M. and Rohren, E.M., 2023, May. Radiation dosimetry, artificial intelligence and digital twins: old dog, new tricks. In *Seminars in Nuclear Medicine* (Vol. 53, No. 3, pp. 457-466). WB Saunders.
7. Castaneda, C., Nalley, K., Mannion, C., Bhattacharyya, P., Blake, P., Pecora, A., Goy, A. and Suh, K.S., 2015. Clinical decision support systems for improving diagnostic accuracy and achieving precision medicine. *Journal of clinical bioinformatics*, 5, pp.1-16.
8. Johnson, R.J., 2016. A comprehensive review of an electronic health record system soon to assume market ascendancy: EPIC. *J Health Commun*, 1(4), p.36.
9. Raffoux, C., 1995. EMDIS: European Marrow Donor Information System. In *Health in the New Communications Age* (pp. 367-372). IOS Press.
10. Шемет, І.А., 2017. Модуль «EMCiMED Scientific» як інструмент обробки медичних даних. *ББК 72 Н 34*, p.64.
11. Martseniuk, V. and Milian, N., 2019. About the approach of solving machine learning problems integrated with data from open source systems of electronic medical records. *Вісник Тернопільського національного технічного університету*, 95(3), pp.105-115.
12. Boulos, M.N.K., Wheeler, S., Tavares, C. and Jones, R., 2011. How smartphones are changing the face of mobile and participatory healthcare: an overview, with example from eCAALYX. *Biomedical engineering online*, 10, pp.1-14.
13. Almasan, P., Ferriol-Galmés, M., Paillisse, J., Suárez-Varela, J., Perino, D., López, D., Perales, A.A.P., Harvey, P., Ciavaglia, L., Wong, L. and Ram, V., 2022. Network digital twin: Context, enabling technologies, and opportunities. *IEEE Communications Magazine*, 60(11), pp.22-27.

REFERENCES

1. Lombardo, A., Morabito, G., Quattropiani, S. and Ricci, C., 2022, June. Design, implementation, and testing of a microservices-based Digital Twins framework for network manage-

- ment and control. In 2022 IEEE 23rd International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks (WoWMoM) (pp. 590-595). IEEE
2. Rolle, R.P., Martucci, V.D.O. and Godoy, E.P., 2021. Modular framework for digital twins: Development and performance analysis. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, 32(6), pp.1485-1497.
3. Dobaj, J., Riel, A., Krug, T., Seidl, M., Macher, G. and Egretzberger, M., 2022, May. Towards digital twin-enabled DevOps for CPS providing architecture-based service adaptation & verification at runtime. In *Proceedings of the 17th Symposium on Software Engineering for Adaptive and Self-Managing Systems* (pp. 132-143).
4. Söylemez, M., Tekinerdogan, B. and Kolukısa Tarhan, A., 2022. Challenges and solution directions of microservice architectures: A systematic literature review. *Applied sciences*, 12(11), p.5507.
5. Sun, T., He, X., Song, X., Shu, L. and Li, Z., 2022. The digital twin in medicine: a key to the future of healthcare? *Frontiers in Medicine*, 9, p.907066.
6. Currie, G.M. and Rohren, E.M., 2023, May. Radiation dosimetry, artificial intelligence and digital twins: old dog, new tricks. In *Seminars in Nuclear Medicine* (Vol. 53, No. 3, pp. 457-466). WB Saunders.
7. Castaneda, C., Nalley, K., Mannion, C., Bhattacharyya, P., Blake, P., Pecora, A., Goy, A. and Suh, K.S., 2015. Clinical decision support systems for improving diagnostic accuracy and achieving precision medicine. *Journal of clinical bioinformatics*, 5, pp.1-16.
8. Johnson, R.J., 2016. A comprehensive review of an electronic health record system soon to assume market ascendancy: EPIC. *J Health Commun*, 1(4), p.36.
9. Raffoux, C., 1995. EMDIS: European Marrow Donor Information System. In *Health in the New Communications Age* (pp. 367-372). IOS Press.
10. Shemet, I.A., 2017. Modul «EMSiMED Scientific» yak instrument obrobky medychnykh danykh. *BBK 72 N 34*, p.64.
11. Martseniuk, V. and Milian, N., 2019. About the approach of solving machine learning problems integrated with data from open source systems of electronic medical records. *Visnyk Ternopilskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, 95(3), pp.105-115.
12. Boulos, M.N.K., Wheeler, S., Tavares, C. and Jones, R., 2011. How smartphones are changing the face of mobile and participatory healthcare: an overview, with example from eCAALYX. *Biomedical engineering online*, 10, pp.1-14.
13. Almasan, P., Ferriol-Galmés, M., Paillisse, J., Suárez-Varela, J., Perino, D., López, D., Perales, A.A.P., Harvey, P., Ciavaglia, L., Wong, L. and Ram, V., 2022. Network digital twin: Context, enabling technologies, and opportunities. *IEEE Communications Magazine*, 60(11), pp.22-27.

Received 10.02.2025.
Accepted 17.02.2025.

***Architectural principles for ensuring verification and quality
in systems for creating digital twins of biomedical objects***

The article presents architectural principles aimed at ensuring the quality and reliability of systems for creating digital twins of biomedical objects, with a particular focus on the human larynx as a key research subject. It notes that digital twins have significant potential for accurately simulating the physiological characteristics and states of real organs, opening

new avenues for medical diagnosis and treatment. To achieve high-quality digital models, the proposed system combines modularity and component isolation, providing development flexibility, facilitating error detection, and enhancing system resilience.

A crucial implementation aspect is the use of Docker containerization, which enables unified environments for development, testing, and deployment, ensuring stable operation of all components in real-world conditions. Leveraging a microservice architecture, each system component can be developed and deployed independently, contributing to system flexibility and adaptability to various medical needs. Furthermore, the architecture allows for easy scaling to meet the requirements of specific medical facilities and professionals.

To enhance data accuracy and relevance, the system integrates information from various sources, such as video, audio, and other medical data types, converting them into a unified format to facilitate further analysis and processing. This integration enables doctors to access comprehensive and consistent information on patient status, improving diagnostic accuracy and treatment effectiveness. Based on collected data, a digital twin of the patient's larynx is created, reflecting physiological and functional characteristics in real time, which allows doctors to predict disease progression and select the most effective therapeutic strategies.

The system also upholds high data security standards by implementing multi-level authentication and encryption to protect patient information. Data anonymization principles preserve confidentiality, and distributed storage reduces the risk of unauthorized access. Intuitive interfaces for visualizing digital twins allow doctors to analyze medical data in detail and make informed decisions regarding patient treatment, significantly improving the quality of healthcare services.

Thus, the proposed architecture enables the creation of high-precision digital twins of biomedical objects and supports a comprehensive approach to diagnosis and therapy, marking an important step forward in the development of digital medicine and personalized treatment.

Песчанський Владислав Юрійович – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

Сулема Євгенія Станіславівна – доктор технічних наук, завідувачка кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

Peschanskii Vladyslav – Post-Graduate Student of Computer Systems Software Department National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

Sulema Yevgeniya – DSc, Head of Computer Systems Software Department. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

ЗАСТОСУВАННЯ МОДЕЛІ EFFICIENTNET ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ІШЕМІЧНОЇ ХВОРОБИ СЕРЦЯ (ІХС)

Анотація. У даній статті розглядається модель нейронної мережі яка сприяє ранньому виявленню ішемії захворювання серця на рентгенівських знімках, яка відіграє важливу роль у діагностиці та лікуванні серцево-судинних захворювань. У цій статті пропонується дослідження, присвячене застосуванню згорткових нейронних мереж (ЗНМ) для автоматичного виявлення ішемічних захворювань серця на рентгенівських знімках.

У роботі використовувався набір даних, що містить рентгенівські знімки грудної клітки, анотовані досвідченими кардіологом. Було розроблено та навчено ЗНМ-модель, здатну виявляти ознаки ішемічних захворювань на основі рентгенівських знімків. Модель була навчена на невеликій кількості даних (700 знімків) та протестована на незалежному наборі тестових знімків.

Результати дослідження показали, що згорткова нейронна мережа ефективно розпізнає ознаки ішемічних захворювань серця на рентгенівських знімках з високою точністю та надійністю. Це може значно покращити можливості ранньої діагностики ІЗС та допомогти лікарям приймати обґрунтовані рішення щодо лікування пацієнтів.

Висновки цього дослідження підтверджують потенціал застосування згорткових нейронних мереж у галузі медичної діагностики та вказують на новий крок у розвитку автоматизованого виявлення ішемічних захворювань серця на основі рентгенівських знімків. Це відкриває перспективи для поліпшення точності та ефективності діагностики серцево-судинних захворювань та зниження навантаження на медичний персонал.

Ключові слова: Нейронна мережа, штучний інтелект, ішемічна хвороба серця, графік, Google Colab, Tensorflow, Efficientnet.

Вступ. Ішемічна хвороба серця є однією з найпоширеніших серцево-судинних захворювань, яка виникає внаслідок порушення кровопостачання до серцевого м'язу через звуження артерій, що живлять серце. Рання діагностика ішемічної хвороби серця є критично важливою для забезпечення ефективного лікування та запобігання подальшим ускладненням.

За останні роки зростає зацікавленість використання згорткових нейронних мереж[1] (Convolutional Neural Networks, CNNs) для виявлення ішемічної хвороби серця на ранніх стадіях. Згорткові нейронні мережі є потужними інструментами машинного

навчання, які можуть автоматично виявляти складні закономірності та паттерни в медичних зображеннях.

Використання згорткових нейронних мереж для виявлення ішемічної хвороби серця має декілька переваг. Вони можуть аналізувати великі обсяги даних з високою швидкістю[2], що дозволяє ефективно виявляти аномалії та патологічні зміни на зображеннях серця. Крім того, згорткові нейронні мережі можуть автоматично вивчати признаки та ознаки, що важко визначити людиною, та використовувати їх для класифікації зображень на здорові та ішемічно уражені серця.

Проте, розробка ефективних згорткових нейронних мереж для виявлення ішемічної хвороби серця є викликом. Вимагається детальне дослідження архітектур моделей, методів попередньої обробки даних, технік навчання та оцінки результатів. Також, необхідно мати достатній обсяг медичних даних з різними класами (здорові та ішемічно уражені серця) для тренування та перевірки моделей.

У данному дослідженні пропонується детальний огляд моделей, методів та підходів[3], що використовуються для виявлення ішемічної хвороби серця з використанням згорткових нейронних мереж. Це дозволить з'ясувати потенціал таких підходів та визначити найефективніші методи для розв'язання даної проблеми.

Постановка проблеми. Постановка проблеми пов'язана зі складнощами виявлення ішемічної хвороби серця на ранніх стадіях та необхідністю розробки ефективних методів та моделей для цього. Основні проблеми, які можуть виникати, включають:

- Недостатність медичних даних: Отримання великого обсягу якісних та репрезентативних медичних даних може бути викликом. Недостатня кількість даних або їх недоступність можуть обмежити точність та ефективність моделей.

- Неспецифічні симптоми: Ішемічна хвороба серця може проявлятися різноманітними симптомами, які можуть бути схожими на інші захворювання. Це може призводити до неточності та помилкових результатів при виявленні хвороби.

- Складність обробки[4] медичних зображень: Медичні зображення, зокрема рентгенівські знімки серця, можуть бути великими за розміром та містити складні структури. Обробка та аналіз таких зображень вимагає розробки спеціалізованих методів та архітектур моделей.

- Неоднорідність даних: Медичні дані можуть бути неоднорідними, як з точки зору якості зображень, так і з точки зору класифікації. Наявність шуму, артефактів або інших перешкод може ускладнити точне виявлення ішемічної хвороби серця.

- Переносимість моделей: Розроблені моделі та методи виявлення ішемічної хвороби серця можуть виявитися непереносними до різних медичних закладів або пацієнтів. Необхідно враховувати специфічні особливості медичних протоколів та умов.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У даній статті розглядається класифікаційна модель EfficientNet, які використовується у згорткових нейронних мережах для діагностики ішемічних захворювань серця.

Постановка задачі. Метою даного дослідження є вибір оптимальних моделей навчання згорткової нейронної мережі для раннього виявлення ішемічних захворювань

серця. Для досягнення мети потрібно визначити такі моделі класифікації, які забезпечать найкращі результати навчання та точність діагностики.

Основний матеріал Розділення медичних даних на два класи – здорові пацієнти та пацієнти з ішемічними захворюваннями серця – є першим етапом побудови моделі класифікації для виявлення ІЗС на ранніх стадіях. Таке розділення дозволяє навчати модель розрізняти між здоровими та хворими пацієнтами, спираючись на характерні ознаки, виявлені на рентгенівських знімках серця.

Класифікація медичних даних на два класи, як зазначено у [5], значно спрощує створення навчального набору, на основі якого модель буде тренуватися для розпізнавання патологічних змін, пов'язаних з ішемічною хворобою серця. Для цього можуть використовуватися методи ручної анотації даних або автоматизовані підходи для виявлення ознак ішемічних змін на зображеннях.

Цей випадок показано на рентгенівських знімках, які зображені на рис. 1.

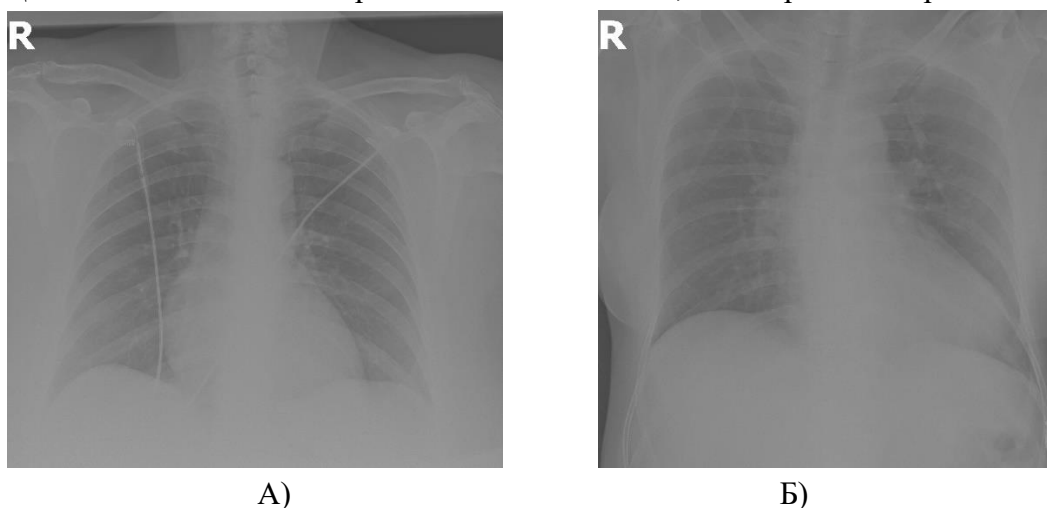


Рисунок 1 – Рентгенівські знімки : А) здорової людини Б) людини з ІЗС

Після класифікації даних на два класи модель може бути навчена за допомогою нейронних мереж, використовуючи різні архітектури EfficientNet [6], методи згорткового навчання та підхід передавання знань (transfer learning). Після завершення навчання модель здатна класифікувати нові зображення серця та виявляти ішемічні захворювання серця на ранніх стадіях.

Для підвищення точності моделі, зокрема у випадках з невеликим набором даних, важливо розглянути додаткові методи аугментації зображень[6]. Зокрема, це можуть бути:

- Використання штучного шуму для збагачення варіацій у зображеннях.
- Застосування методів геометричних трансформацій (масштабування, поворот, зміна яскравості).
- Застосування методів стилізації, наприклад, перетворення зображень у стилі інфрачервоних знімків, що дозволяє моделі краще узагальнювати патерни.

Оцінка продуктивності. Для більшої об'єктивності результатів моделі слід використовувати кілька метрик, зокрема:

- Точність (Accuracy[7]): загальний відсоток правильних передбачень.
- AUC-ROC: здатність моделі розрізняти між класами.
- F1-міра: баланс між точністю та повнотою.
- Матриця похибок: для аналізу помилкових позитивних і негативних прогнозів.

Запропоновану модель можна інтегрувати у систему підтримки прийняття рішень у клініках. Модель може працювати як допоміжний інструмент для лікарів, надаючи швидку оцінку стану пацієнта.

На рисунку 2 наведені результати тестування моделі згорткової нейронної мережі для виявлення ішемічної хвороби серця на рентгенівських знімках.

• **Зображення А:** Модель класифікувала знімок як такий, що належить пацієнту з ішемічною хворобою серця (ІЗС). Вказано передбачуваний клас "Ischemia", а також візуалізовано теплову карту (Grad-CAM), яка показує області знімка, найбільш важливі для прийняття рішення.

• **Зображення Б:** Модель класифікувала знімок як такий, що належить здоровому пацієнту. Вказано передбачуваний клас "Healthy" і відповідна теплова карта, що демонструє, які області зображення були використані моделлю для класифікації.

Даний результат свідчить про здатність моделі точно розрізняти здорових пацієнтів і пацієнтів з ішемічною хворобою серця, використовуючи рентгенівські знімки грудної клітки[8].

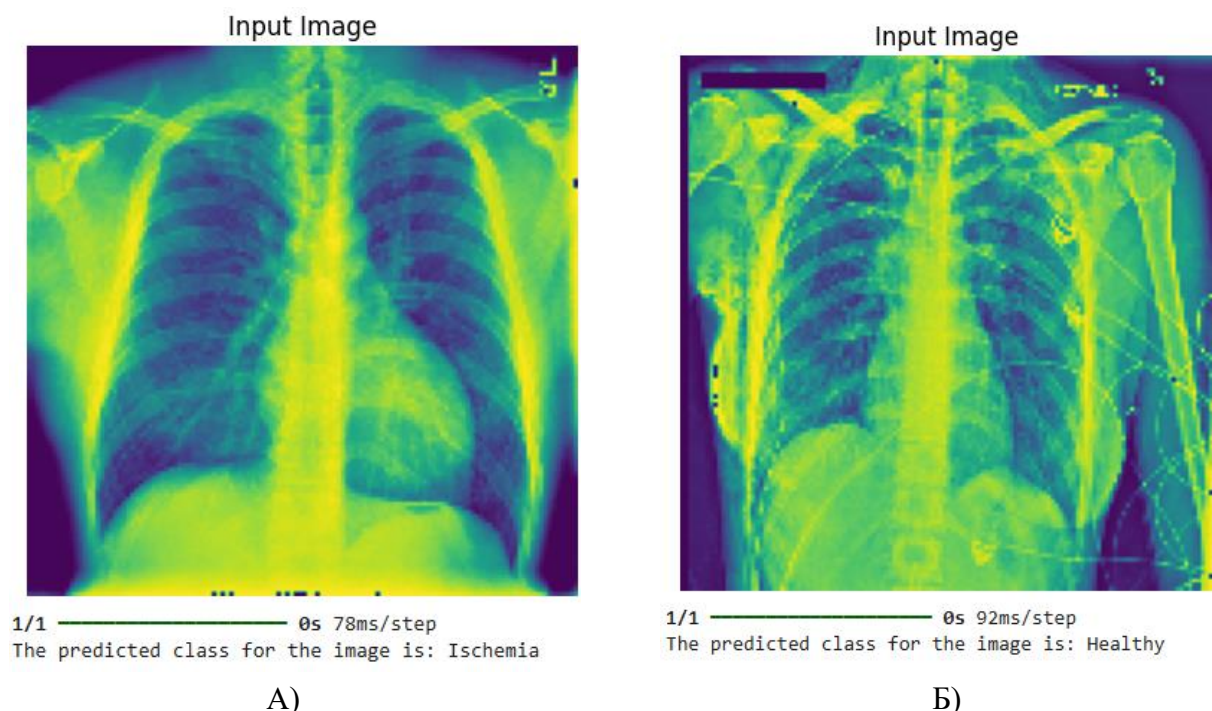


Рисунок 2 – результат тестування: А) пацієнта з ІЗС Б) здорового пацієнта

Висновки. Модель EfficientNetB0[9] продемонструвала високу ефективність у виявленні ішемічних захворювань серця на основі рентгенівських зображень. Основними перевагами є її компактність, швидкість навчання та здатність до узагальнення. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на:

- Розширення набору даних.

- Застосування більш складних архітектур (наприклад, EfficientNetV2).
- Інтеграцію в медичні інформаційні системи.

Цей підхід має великий потенціал для практичного застосування у клінічній діагностиці[10].

ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Tan, M., & Le, Q. (2019). EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. Proceedings of the 36th International Conference on Machine Learning (ICML), PMLR 97:6105-6114.
<https://arxiv.org/abs/1905.11946>
2. Zhou, B., Khosla, A., Lapedriza, A., et al. (2016). Learning Deep Features for Discriminative Localization. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2921-2929.
<https://arxiv.org/abs/1512.04150>
3. Litjens, G., Kooi, T., Bejnordi, B. E., et al. (2017). A Survey on Deep Learning in Medical Image Analysis. Medical Image Analysis, 42, 60-88.
DOI:10.1016/j.media.2017.07.005
4. Wang, S., Zhou, B., Yu, H., et al. (2020). EfficientNet-Based Model for COVID-19 Diagnosis on Chest X-Rays. Journal of Medical Systems, 44, 135.
DOI: 10.1007/s10916-020-01625-5
5. Jain, R., Gupta, M., Taneja, S., & Hemanth, D. J. (2019). Deep learning based detection and analysis of COVID-19 on chest X-ray images. Applied Intelligence, 51(3),1690-1700.
DOI: 10.1007/s10489-020-01714-6
6. Lundervold, A. S., & Lundervold, A. (2019). An overview of deep learning in medical imaging focusing on MRI. Zeitschrift für Medizinische Physik, 29(2), 102-127.
DOI: 10.1016/j.zemedi.2018.11.002
7. Ching, T., Himmelstein, D. S., Beaulieu-Jones, B. K., et al. (2018). Opportunities and obstacles for deep learning in biology and medicine. Journal of the Royal Society Interface, 15(141), 20170387. DOI: 10.1098/rsif.2017.0387
8. Szegedy, C., Ioffe, S., Vanhoucke, V., & Alemi, A. (2017). Inception-v4, Inception-ResNet and the Impact of Residual Connections on Learning. AAAI Conference on Artificial Intelligence.
9. Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., et al. (2017). MobileNets: Efficient Convolutional Neural Networks for Mobile Vision Applications. ArXiv Preprint.
10. Rajpurkar, P., Irvin, J., Zhu, K., et al. (2017). CheXNet: Radiologist-Level Pneumonia Detection on Chest X-Rays with Deep Learning. ArXiv Preprint.

Received 18.02.2025.
Accepted 21.02.2025.

Application of the efficientnet model for detecting ischemic heart disease

This article examines a neural network model that facilitates the early detection of ischemic heart disease on chest X-rays, playing a crucial role in the diagnosis and treatment of cardiovascular diseases. The study explores the application of convolutional neural networks(CNNs) for the automatic detection of ischemic heart disease on chest X-rays.

A dataset containing chest X-rays annotated by an experienced cardiologist was used in the study. A CNN model was developed and trained to detect signs of ischemic heart disease based on chest X-rays. The model was trained on a small dataset (700 images) and tested on an independent set of test images.

The research results demonstrated that the convolutional neural network effectively recognizes signs of ischemic heart disease on chest X-rays with high accuracy and reliability. This could significantly improve the capabilities for early diagnosis of ischemic heart disease and help clinicians make informed decisions regarding patient treatment.

The findings of this study confirm the potential of using convolutional neural networks in medical diagnostics and represent a new step forward in the automated detection of ischemic heart disease based on chest X-rays. This paves the way for improving the accuracy and efficiency of cardiovascular disease diagnostics and reducing the burden on medical personnel.

Keywords: Neural network, artificial intelligence, ischemic heart disease, chest X-rays, Google Colab, TensorFlow, EfficientNet.

Соломатін Владислав Андрійович – Аспірант, каф «ЕОМ», Дніпровський Національний Університет ім. О. Гончара.

Байбуз Олег Григорович – зав. каф «ЕОМ», Дніпровський Національний Університет ім. О. Гончара.

Solomatin Vladyslav – Postgraduate student, "EOM" faculty, Dnipro National University named after O. Honchara.

Baibuz Oleg - head. caf "EOM", Dnipro National University named after O. Honchara.

Y.V. Tkachov, T.V. Nosova, O.V. Kalinin

ENHANCING THE CORROSION RESISTANCE OF Al-Zn-Mg-Cu ALUMINUM ALLOYS THROUGH MODIFICATION WITH TITANIUM CARBIDE POWDER

Annotation. Improving the characteristics of industrial alloys, particularly their corrosion resistance, is a relevant task for both metallurgists and materials science specialists. The implementation of new technologies and the selection of materials for specific operating conditions stimulate the development of technological methods for altering the characteristics of base alloys. The investigation and application of new effective modifiers and modification technologies represent an important research direction. Under certain operating conditions, aluminum alloys, particularly the Al-Zn-Mg-Cu system, are subjected to significant corrosive influences, which negatively affect their mechanical properties and longevity. Therefore, the challenge lies in the necessity to develop new approaches and technologies. Specifically, this study proposes a method for modifying the alloys using titanium carbide powder and investigates the effect of this modification on the corrosion resistance of the studied alloy. The aim of the work is to establish the relationship between the structure, physical-mechanical properties, and corrosion resistance. To achieve this goal, modification of alloys V93 and V95 with titanium carbide powder was carried out, and the microstructures and corrosion resistance before and after modification were studied. Corrosion tests, including laboratory methods, encompassed the determination of general, intergranular, and corrosion cracking, which allowed for the assessment of the effectiveness of the proposed modification method. The results obtained confirmed the effectiveness of modifying the studied alloys with titanium carbide of 15 μm particle size. Observations of corrosion processes indicated a reduction in overall corrosion, with the area of corrosion sites decreasing from 70% to 50% after modification. There was also a significant reduction in intergranular corrosion in alloy V95, indicating an improvement in its corrosion resistance. In both modified alloys, intergranular corrosion was not observed, and corrosion cracking of the base metal was absent during the 60-day test period. The test results indicate an increase in corrosion resistance after modification.

Keywords: aluminum alloys, corrosion resistance, alloy modification, titanium carbide, physical and mechanical properties, corrosion tests

Statement of the Problem. The development and implementation of novel manufacturing methods are critical for the advancement and optimization of production processes, as their application enhances technological efficiency and reduces raw material and energy consumption. Innovations such as forming technologies for components using additive methods,

the creation of composite materials with specific properties, automation and robotization of production, as well as the latest thermal treatment technologies, contribute to enhancing the characteristics of machines and equipment distinguished by high productivity, reliability, durability, and competitiveness. Among these innovative technologies, significant attention is given to alloy modification techniques, which involve the introduction of minute particles of other materials into the melt of the base metal, such as aluminum. This process aims to alter the physical and mechanical properties of the alloys, including their strength, plasticity, corrosion resistance, and manufacturability, by changing the crystalline structure of the alloy with micro- and nanoscale particles.

In various fields of mechanical engineering, wrought aluminum alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system are utilized for the fabrication of critical structural components, specifically alloys V93 and V95. These alloys exhibit high mechanical properties and significant corrosion resistance [3, 4], which substantiates their relevance and appropriateness for application under critical operating conditions. However, under specific operational conditions, components made from these alloys may be subjected to simultaneous influences from several types of corrosion, negatively impacting the durability and reliability of the structures [5, 9]. This research focuses on studying the effect of modification on the properties of wrought aluminum alloys V93 and V95 of the Al-Zn-Mg-Cu system, particularly regarding their corrosion resistance and the assessment of their suitability for use under critical operating conditions.

Analysis of Recent Research and Publications. The analysis of results from numerous contemporary studies indicates an active exploration of various approaches to modifying aluminum and other alloys, aimed at achieving a targeted change in the characteristics of the base material. To summarize the approaches, modifiers can be classified according to their influence into the following groups [2, 5, 16]. *First-order modifiers* influence the structure by altering the energy characteristics, namely the activation energy and surface tension during the nucleation of a new phase. *Second-order modifiers* affect the structure by acting as solid phase nuclei. *Third-order modifiers*, known as inoculators “coolers”, lower the metal temperature and increase the crystallization rate, thereby slowing down the development of element liquation and reducing the overheating of the melt during crystallization.

Modification is considered one of the most effective methods for improving the quality of cast products. It contributes to the elimination of columnar and fan-like structures, grain and dendrite refinement, the achievement of a homogeneous microstructure, as well as the enhancement of the mechanical and corrosion properties of alloys [3, 4, 5, 7].

The conventional industrial method for modifying aluminum alloys using sodium salts has limited effectiveness due to the low melting point of these modifiers, leading to their rapid dissolution in the molten metal. This restricts the ability of sodium salts to provide the necessary grain refinement and to form stable crystallization centers, which, in turn, prevents the achievement of desired mechanical and technological characteristics of the alloys. Consequently, contemporary research favors the use of dispersive refractory materials, which demonstrate better results in modifying aluminum alloys [6-8].

Aluminum alloys from the Al-Zn-Mg-Cu system are widely used in stressed structures across various industries, including construction, automotive manufacturing, as well as in the

production of aviation and aerospace technology. This is due to their favorable combination of physical and mechanical properties, workability, and corrosion resistance [1, 3]. Industrial aluminum alloys from this system are characterized by strengths in the range of 400-450 MPa while maintaining high ductility [2, 4, 6, 17]. The primary methods for further improving the mechanical properties of aluminum alloys include solid solution strengthening, dispersion strengthening, thermomechanical treatment, and modification [2, 6, 7].

Currently, a promising direction is the application of dispersive refractory modifiers, namely: carbides, nitrides, borides, as well as pure metals. The influence of modifiers in the form of dispersive additives lies in creating additional artificial crystallization centers in the melt. For this, such additives must be proportionate to the sizes of critical nuclei of the matrix phase and capable of providing their enough quantity for forming a fine-dispersed structure in the casting. Specifically, the modification with refractory powdered titanium carbide is widely used for producing structural elements with high physical-mechanical properties. The results presented in works [2, 5] indicate that the optimal modifier for aluminum alloys is powdered titanium carbide with particle sizes of 10–15 μm [2, 11, 12].

Powdered titanium carbide has a high melting point, making it suitable for use in processes that require significant temperatures, such as aluminum alloy casting. This allows for the avoidance of its melting during processing. The addition of this material contributes to the creation of new crystallization centers in the melt, ensuring uniformity and a fine-dispersed structure, thus improving the mechanical properties of the alloys. The effect of titanium carbide on aluminum alloys positively impacts their strength, ductility, and corrosion resistance, making them more suitable for use in structures with high mechanical performance requirements. Additionally, titanium carbide easily integrates into the structure of alloys, enhancing their workability and improving processing techniques. Thus, the use of modifiers, particularly powdered titanium carbide, demonstrates significant potential in the creation of new alloys with enhanced strength and workability, opening new opportunities for optimizing the properties of aluminum alloys in various industrial applications.

Purpose of the Study. The purpose of this study is to investigate the changes in the structure, physical and mechanical properties, and corrosion resistance of wrought aluminum alloys V93 and V95 of the Al-Zn-Mg-Cu system after their modification with titanium carbide powder. To achieve this goal, the following tasks are outlined:

- 1) modify aluminum alloys V93 and V95 of the Al-Zn-Mg-Cu system using titanium carbide powder with a particle size of 15 μm ,
- 2) examine the microstructure of these alloys in their initial state and after corrosion testing, as well as before and after modification,
- 3) conduct corrosion tests to investigate the following types of corrosion: general corrosion, exfoliation corrosion, intergranular corrosion, and stress corrosion cracking.

Statement of the main research material. This study investigates the corrosion properties of V93 and V95 alloys both before and after modification. To improve the quality and processability of Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys, their melts were modified using fine titanium carbide-based powders. Titanium carbide powder was chosen based on the compatibility

of the crystal lattices of aluminum and TiC (both having face-centered cubic lattices) and the difference in atomic radii between aluminum and TiC.

Corrosion testing is a fundamental practical method for corrosion control and can be categorized into three primary groups: laboratory, field, and operational tests [18, 19]. *Laboratory* tests are conducted under conditions that can be precisely defined and controlled, although they often differ from the actual conditions experienced in practice. Laboratory testing is employed to study the mechanisms of corrosion, for comparative assessment of corrosion resistance of metals and alloys, as a control tool during the development of new corrosion-resistant alloys, for adjusting the composition and processing technology of alloys, and for many other purposes. *Field* and *operational* tests are necessary for selecting the most suitable materials capable of functioning in environments with varying degrees of corrosivity and for determining their service life.

Table 1 presents the characteristics of carbides [20], specifically those with cubic crystal lattices (titanium carbide TiC and others based on refractory metals). Carbon atoms occupy interstitial positions between the metal atoms, forming interstitial phases. Many carbides with cubic structures exhibit wide regions of homogeneity. This explains why the removal of some carbon atoms from the carbide lattice does not lead to the destruction of the compound or significant changes in its properties.

Table 1

Properties of Carbides

Carbide	β MoC	γ WC	TiC
Melting Temperature, T (°C)	2522	2780	3067
Hardness, HRA	74	80	93

In TiC, the carbon content can vary from 20% to 50% (atomic) without significant alteration of the type and properties of the crystal lattice. However, there exists the possibility of substituting the missing carbon atoms in the carbide with other atoms (such as oxygen, nitrogen, etc.). To determine the corrosion resistance of aluminum alloys modified with titanium carbide powder, tests were conducted to assess general, intergranular, and exfoliation corrosion, as well as corrosion cracking. The study utilized microstructural analysis methods and corrosion testing methods for general, intergranular, exfoliation corrosion, and corrosion cracking.

Intergranular corrosion was evaluated according to standard methodology [15]. The tests were conducted in the following solution: 30 g of NaCl + 10 cm³ of HCl. The solution temperature was maintained at +22±1°C, and the duration of the test was 24 hours. Flat samples measuring 20 × 10 × 3 mm were cut from the castings. The assessment was performed metallographically using an optical microscope NEOPHOT–2. The characteristics of the corrosion and the maximum depth of intergranular corrosion were recorded [5, 6]. *Exfoliation corrosion* is a type of corrosion that primarily develops parallel to the deformation vector generated during the rolling or pressing of the semi-finished product and is accompanied by

the formation of cracks in that direction, detachment of individual metal particles, or complete destruction of the samples or components [7, 8]. This type of corrosion mainly occurs along the boundaries of elongated grains. *Corrosion cracking* is a type of metal degradation caused by the simultaneous action of a corrosive environment and nominally static tensile stress, resulting in the formation of cracks [5, 11, 12]. During the corrosion cracking test, the samples were cyclically immersed in a 3% NaCl solution: 10 minutes in the solution, followed by 50 minutes in air. The duration of the tests was 45 days.

To obtain comparative data on the corrosion resistance of the alloys, tests for general corrosion were conducted according to the standard methods used in industrial enterprises [13, 14]. To simulate harsh operating conditions, a method was chosen that involved testing under conditions of 100% relative humidity, as well as a method involving periodic exposure to a 3% sodium chloride (NaCl) solution at room temperature. The assessment of the corrosion resistance of aluminum alloys was based on changes in the appearance of the samples and variations in mass.

Findings. Analysis of the test results showed that all investigated aluminum alloys, after modification, regardless of surface condition, exhibit sufficiently high corrosion resistance when tested under conditions of 100% relative humidity; corrosion damage is virtually absent. After three cycles of testing, unmodified samples exhibited surface darkening characterized by isolated spots and points. After ten cycles of testing in the humidity chamber, the surfaces of aluminum alloys V93 and V95 prior to modification with titanium carbide powder showed darkening in the form of spots covering up to 70% of the surface area, while post-modification, this coverage was reduced to 50%.

The results of the general corrosion tests indicate that modification with titanium carbide powder leads to enhanced corrosion resistance of the alloys due to a reduction in the corrosion rate: for alloy V93 by 10.8% to 16.7%, and for alloy V95 by 5.6% to 6.3%. The improvement in corrosion resistance can be attributed to the refinement of the structure of the aluminum alloys. During modification, the length of numerous interfacial boundaries increases. Intermetallics and impurity atoms that were located at the interfacial boundaries in the alloy prior to modification become distributed over a significantly larger area after modification. Consequently, they exert less negative influence on the corrosion resistance of the aluminum alloys. Figure 1 presents the microstructures of the investigated alloy before and after modification with titanium carbide powder. An important role is also played by the stressed state of the modified structure. The introduction of dispersed titanium carbide powder makes the microvolumes of wrought alloys more energetically stressed, which enhances their corrosion resistance.

Aluminum alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system are characterized by intergranular corrosion [2, 9, 10]. The sensitivity to intergranular corrosion arises due to the structural inhomogeneity of grain boundaries, the precipitation of secondary phases, the depletion or enrichment of adjacent regions of the α -solid solution with alloying elements, and the formation of sub-microscopic and microscopic voids due to the flow and coagulation of vacancies. In the modified alloys under investigation, a tendency toward intergranular corrosion has not been

observed. In alloy V95, a β -phase has been identified in the form of a network along the grain boundaries (Figure 2, a), with intergranular corrosion originating from pitting on the β -phase (Figure 2, b).

In the wrought alloy, the modification with titanium carbide leads to a reduction in the precipitation of the β -phase and its uniform distribution throughout the volume of the work-piece, resulting in the absence of susceptibility to intergranular corrosion. Since the alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system are categorized as deformable and are utilized in welded structures, significant indicators include exfoliation corrosion and corrosion cracking. The results of the tests for exfoliation corrosion of alloys V93 and V95, both before and after modification, are presented in Table 2.

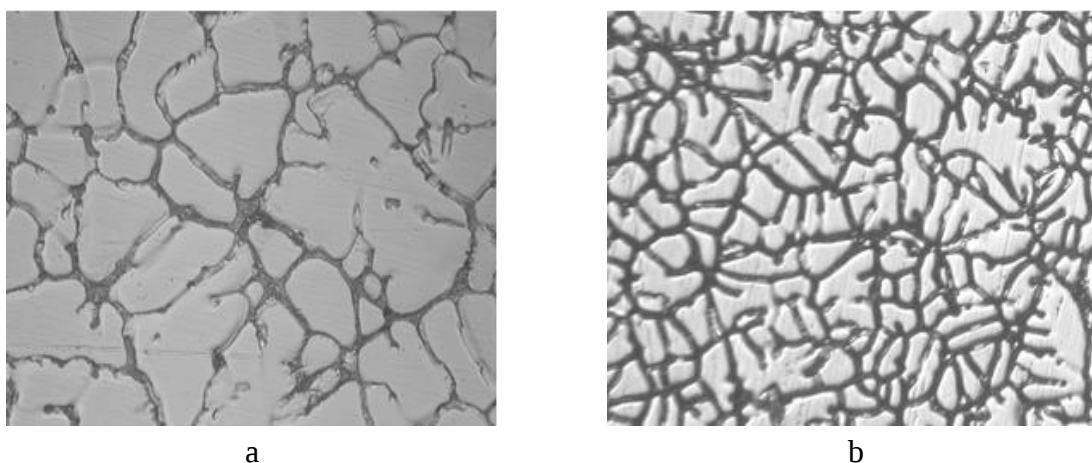


Figure 1 — Microstructures of the wrought alloy V95 ($\times 200$):
a — before modification; b — after modification

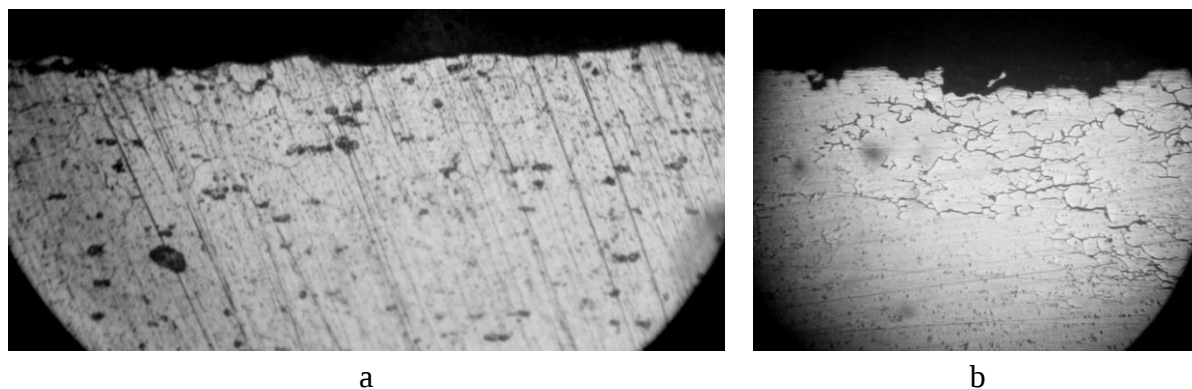


Figure 2 — Tests for intergranular corrosion of alloy V95: a — β -phase in the form of a network along the grain boundaries ($\times 500$); b — intergranular corrosion originating from pitting on the β -phase ($\times 100$)

Table 2

Results of Exfoliation Corrosion Tests for Alloys V93 and V95

Alloy	Exfoliation Corrosion	Rating
V93	Blisters with a diameter of 2–3 mm across the entire surface	5
V95	Blisters with a diameter of 2–3 mm covering 10% of the area	4
V95 + TiC	No blisters present	2

Corrosion cracking was evaluated on the base metal and the weld joint produced by gas tungsten arc welding. The test results are presented in Table 3.

Table 3

Corrosion Cracking of Base Metal and Weld Joints of Alloys B93 and B95

Alloy	Corrosion Cracking			
	Base Metal		Weld Joints	
	Stress	Testing Duration Until Cracking, days	Stress, MPa	Testing Duration Until Cracking, days
V93	0,9 σ_B	more than 55	200	45
V95	0,9 σ_B	more than 55	200	55
V95 + TiC	0,9 σ_B	more than 55	200	more than 55

Conclusions. The modification of wrought aluminum alloys of the Al-Zn-Mg-Cu system was conducted using titanium carbide powder with a particle size of 15 μm . Tests of the alloys for general corrosion revealed that after ten cycles, corrosion spots occupying 70% of the surface were observed on the unmodified samples, whereas only 50% was noted on the modified samples. This indicates a reduction in the corrosion rate in the modified samples. A decrease in the manifestation of intergranular corrosion was observed in the alloy samples of B95 after modification: from a score of four in the unmodified samples to a score of two in the modified ones. Intergranular corrosion was not detected in the modified alloys B93 and B95. Corrosion cracking of the base metal of the Al-Zn-Mg-Cu system alloys was not observed over a period of 60 days of testing. In the welded joint of the modified B95 alloy, an increase in the time to cracking was noted. No corrosion cracking was detected after 60 days of testing. The results of industrial tests confirmed a significant increase in the corrosion resistance of wrought modified aluminum alloys.

ЛІТЕРАТУРА

1. Венгер, В. В. (ed.). (2024). *Розвиток титанової та алюмінієвої промисловості України на інноваційній основі: перспективи та обмеження*. ДУ "Ін-т екон. та прогнозув. НАН України". <https://tinyurl.com/ief-org-24>
2. Калініна, Н. Є., Никифорчин, Г. М., Калінін, О. В., Маруха, В. І., & Кирилів, В. І. (2017). *Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів*. Простір-М. <https://nvd-nanu.org.ua/1d77909f-518b-24f6-e984-1a83de010161/>
3. Nosova, T. V., Mamchur, S. I., Moroz, Y. V., & Tkachov, Y. V. (2024). Підвищення

механічних властивостей конструкційної сталі 09Г2С. *Journal of Rocket-Space Technology*, 33(4), 35–40. <https://doi.org/10.15421/452405>

4. Івасишин, А. Д., Остап, О. П., & Кузьменко, М. М. (2014). Вплив термічної обробки на структуру і циклічну тріщиностійкість сплаву Ti–10, 3Al–3, 0Zr–1, 2Si. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 50(6), 73–81.

<http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/136883>

5. Остап, О. П., Андрейко, І. М., Маркашова, Л. І., Головатюк, Ю. В., Семенець, О. І., & Ковальчук, Л. Б. (2013). Вплив тривалої експлуатації на структуру і фізико-механічні властивості алюмінієвих сплавів типу Д16 і В95. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, 49(1), 18–27. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/135204>

6. Kalinina, N. Y., Nosova, T. V., Tsokur, N. I., Glushkova, D. B., Kirichenko, I. G., & Demchenko, S. V. (2022). Increasing corrosion resistance of welded joints as a result of heat treatment. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 3(3 (98)), 28–32. <https://doi.org/10.30838/j.pmhtml.2413.270922.28.902>

7. Kalinina, N. E., Hlushkova, D. B., Dzbur, Y. O., Khodyrev, S. Y., Kalinin, V. T., & Polishko, S. A. (2020). Вплив температури термічної обробки на стійкість до міжкристалітної корозії зварних з'єднань. *Journal of Chemistry and Technologies*, 28(1), 34–41. <https://doi.org/10.15421/082005>

8. Kalinina, N. E., Hlushkova, D. B., Voronkov, A. I., Sanin, A. F., Kalinin, A. V., Nosova, T. V., & Bondarenko, O. V. (2020). Special features of the phase composition and structure of aluminum alloys modified by refractory nanocompositions. *Functional Materials*, 27(3), 508–512. <https://doi.org/10.15407/fm27.03.508>

9. Петрашов, О. С., Капустян, О. Є., Волчок, І. П., Мітяєв, О. А., & Акімов, І. В. (2023). Дослідження та підвищення механічних властивостей силуміну АК7ч. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*, (1), 36–42. <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2023-1-5>

10. Остап, О. П., Андрейко, І. М., Головатюк, Ю. В., Семенець, О. І., & Ковальчук, Л. Б. (2014). Низькотемпературна і корозійна циклічна тріщиностійкість алюмінієвих сплавів Д16АТНВ і В95Т1 після тривалої експлуатації. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*, (50, № 3), 38–44. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PNKhMM_2014_50_3_6

11. Калініна, Н. Є., Носова, Т. В., Мамчур, С. І., Цокур, Н. І., & Комаров, М. О. (2021). Дослідження процесу модифікування ливарних алюмінієвих сплавів. *Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University*, 94, 55. <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2021.94.0.55>

12. Джур, Є., Калініна, Н., Джур, О., Калінін, О., Носова, Т., & Мамчур, С. (2021). Підвищення властивостей деформованих алюмінієвих сплавів модифікованих наноконпозиціями. *Космічна наука і технологія*, 27(6), 98–104. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.098>

13. Держспоживстандарт України. (1996). *ДСТУ 2839-94 (ГОСТ 1583-93). Сплави алюмінієві ливарні. Технічні умови.*

14. Держспоживстандарт України. (2008). *ДСТУ EN 10045-1:2006 Матеріали металеві. Випробування на ударний вигин за Шарпі. Частина 1. Метод випробування (EN 10045-1:1990, IDT).*

15. Держспоживстандарт України. (2008). *ДСТУ EN 575:2006 Алюміній та алюмінієві сплави. Лігатури, одержані переплавленням. Технічні умови (EN 575:1995, IDT).*

16. Франчук, В. П., Лаухін, Д. В., Зіборов, К. А., Ротт, Н. О., & Федоряченко, С. О. (2021). Вплив теплофізичних процесів, що відбуваються в зоні рухомого контакту, на механічні властивості поверхневого шару матеріалів. *Collection of Research Papers of the National Mining University*, 65, 118–129. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.118>
17. Доценко, Ю. В., Селівьорстов, В. Ю., Насонов, Д. М., & Насонов, М. М. (2021). Перспективи поліпшення властивостей вторинних ливарних сплавів системи Al-Si з використанням процесу модифікування. *Information Technologies in Metallurgy and Machine Building*, 28–33. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.022>
18. Hirsch, J. (2019). *Aluminium Alloys: Innovative Applications and Potential Markets*. Springer.
19. Altenpohl, C. (2020). *Modern Aluminum Alloys: Structure, Properties, and Manufacturing*. Springer.
20. Fisichella, M., & Giovanni, S. (2021). *Corrosion and Surface Treatment in Aluminium Alloys*. CRC Press.

REFERENCES

1. Venher, V.V. (ed.). (2024). Rozvytok tytanovoi ta aliuminiievoi promyslovosti Ukrainy na innovatsiinii osnovi: perspektyvy ta obmezhenia. DU "In-t ekon. ta prohnouzuv. NAN Ukrainy". <https://tinyurl.com/ief-org-24>
2. Kalinina, N.Ye., Nykyforchyn, H.M., Kalinin, O.V., Marukha, V.I., & Kyryliv, V.I. (2017). Struktura, vlastyvoli ta vykorystannia konstruktsiinykh nanomaterialiv. Prostir-M. <https://nvd-nanu.org.ua/1d77909f-518b-24f6-e984-1a83de010161/>
3. Nosova, T. V., Mamchur, S. I., Moroz, Y. V., & Tkachov, Y. V. (2024). Pidvyshchennia mekhanichnykh vlastyvostei konstruktsiinoi stali 09H2S. *Journal of Rocket-Space Technology*, 33(4), 35–40. <https://doi.org/10.15421/452405>
4. Ivasyshyn, A. D., Ostash, O. P., & Kuzmenko, M. M. (2014). Vplyv termichnoi obrobky na strukturu i tsyklichnu trishchynostiikist splavu Ti–10, 3Al–3, 0Zr–1, 2Si. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, 50(6). 73–81. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/136883>
5. Ostash, O. P., Andreiko, I. M., Markashova, L. I., Holovatiuk, Yu. V., Semenets, O. I., & Kovalchuk, L. B. (2013). Vplyv tryvaloi ekspluatatsii na strukturu i fizyko-mekhanichni vlastyvoli aliuminiievykh splaviv typu D16 i V95. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, 49(1), 18–27. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/135204>
6. Kalinina, N. Y., Nosova, T. V., Tsokur, N. I., Glushkova, D. B., Kirichenko, I. G., & Demchenko, S. V. (2022). Increasing corrosion resistance of welded joints as a result of heat treatment. *Physical Metallurgy and Heat Treatment of Metals*, 3(3 (98)), 28–32. <https://doi.org/10.30838/j.pmhtml.2413.270922.28.902>
7. Kalinina, N. E., Hlushkova, D. B., Dzhur, Y. O., Khodyrev, S. Y., Kalinin, V. T., & Polishko, S. A. (2020). Vplyv temperatury termichnoi obrobky na stiikist do mizhkrystalitnoi korozii zvarnykh ziednan. *Journal of Chemistry and Technologies*, 28(1), 34–41. <https://doi.org/10.15421/082005>
8. Kalinina, N. E., Hlushkova, D. B., Voronkov, A. I., Sanin, A. F., Kalinin, A. V., Nosova, T. V., & Bondarenko, O. V. (2020). Special features of the phase composition and structure of aluminum alloys modified by refractory nanocompositions. *Functional Materials*, 27(3), 508–512. <https://doi.org/10.15407/fm27.03.508>

9. Petrashov, O. C., Kapustian, O. Ye., Volchok, I. P., Mitiaiev, O. A., & Akimov, I. V. (2023). Doslidzhennia ta pidvyshchennia mekhanichnykh vlastyvostei syluminu AK7ch. Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobuduvanni, (1), 36–42. <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2023-1-5>
10. Ostash, O. P., Andreiko, I. M., Holovatiuk, Yu. V., Semenets, O. I., & Kovalchuk, L. B. (2014). Nyzkotemperaturna i koroziina tsyklichna trishchynostiikist aliuminiievykh splaviv D16ATNV i V95T1 pislia tryvaloi ekspluatatsii. Fyzyko-khimichna mekhanika materialiv, (50, № 3), 38–44. http://nbuv.gov.ua/UJRN/PHKhMM_2014_50_3_6
11. Kalinina, N. Ye., Nosova, T. V., Mamchur, S. I., Tsokur, N. I., & Komarov, M. O. (2021). Doslidzhennia protsesu modyfikuvannia lyvarnykh aliuminiievykh splaviv. Bulletin of Kharkov National Automobile and Highway University, 94, 55. <https://doi.org/10.30977/bul.2219-5548.2021.94.0.55>
12. Dzhur, Ye., Kalinina, N., Dzhur, O., Kalinin, O., Nosova, T., & Mamchur, S. (2021). Pidvyshchennia vlastyvostei deformovanykh aliuminiievykh splaviv modyfikovanykh nanokompozytsiiamy. Kosmichna nauka i tekhnologhiia, 27(6), 98–104. <https://doi.org/10.15407/knit2021.06.098>
13. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (1996). DSTU 2839-94 (HOST 1583-93). Splavy aliuminiievi lyvarni. Tekhnichni umovy.
14. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2008). DSTU EN 10045-1:2006 Materialy metalevi. Vyprobuvannia na udarnyi vyhyn za Sharpi. Chastyna 1. Metod vyprobuvannia (EN 10045-1:1990, IDT).
15. Derzhspozhyvstandart Ukrainy. (2008). DSTU EN 575:2006 Aliuminii ta aliuminiievi splavy. Lihatury, oderzhani pereplavlenniam. Tekhnichni umovy (EN 575:1995, IDT).
16. Franchuk, V. P., Laukhin, D. V., Ziborov, K. A., Rott, N. O., & Fedoriachenko, S. O. (2021). Vplyv teplofizychnykh protsesiv, shcho vidbuvaiutsia v zoni rukhomoho kontaktu, na mekhanichni vlastyvosti poverkhnevoho sharu materialiv. Collection of Research Papers of the National Mining University, 65, 118–129. <https://doi.org/10.33271/crpnmu/65.118>
17. Dotsenko, Yu. V., Selivorstov, V. Yu., Nasonov, D. M., & Nasonov, M. M. (2021). Perspektyvy polipshennia vlastyvostei vtorynnykh lyvarnykh splaviv systemy Al-Si z vykorystanniam protsesu modyfikuvannia. Information Technologies in Metallurgy and Machine Building, 28–33. <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.022>
18. Hirsch, J. (2019). Aluminium Alloys: Innovative Applications and Potential Markets. Springer.
19. Altenpohl, C. (2020). Modern Aluminum Alloys: Structure, Properties, and Manufacturing. Springer.
20. Fisichella, M., & Giovanni, S. (2021). Corrosion and Surface Treatment in Aluminium Alloys. CRC Press.

Received 18.02.2025.

Accepted 21.02.2025.

***Підвищення корозійної стійкості алюмінієвих сплавів Al-Zn-Mg-Cu
шляхом модифікування порошковим карбідом титану***

Покращення характеристик промислових сплавів, зокрема їх корозійної стійкості, є актуальним завданням як для металургів, так і для фахівців із матеріалознавства. Впровадження нових технологій та вибір матеріалів для специфічних умов експлуатації стимулюють розробку технологічних методів зміни

характеристик вихідних сплавів. Дослідження та впровадження нових ефективних модифікаторів і технологій модифікування є важливим напрямком досліджень. За певних умов експлуатації алюмінієві сплави, зокрема системи Al-Zn-Mg-Cu, піддаються значним корозійним впливам, що негативно позначається на їх механічних характеристиках і довговічності. Отже, проблема полягає в необхідності розробки нових підходів та технологій. Зокрема, в роботі пропонується метод модифікування означених сплавів порошковим карбідом титану, а також досліджується вплив такого модифікування на корозійну стійкість досліджуваного сплаву. Метою роботи є встановлення зв'язку між структурою, фізико-механічними властивостями та корозійною стійкістю. Для досягнення мети проведено модифікування порошковим карбідом титану сплавів В93 та В95, а також досліджені мікроструктури й корозійна стійкість до і після модифікування. Корозійні випробування, зокрема лабораторні, охоплювали визначення загальної, розшарувальної, міжкристалітної корозії та корозійного розтріскування, що дозволило оцінити ефективність запропонованого методу модифікування. Одержані результати підтвердили ефективність модифікування досліджуваних сплавів порошковим карбідом титану фракції 15 мкм. Спостереження за корозійними процесами вказали на зменшення загальної корозії, а саме площа корозійних осередків зменшилася з 70% до 50% після модифікування. Також було досягнуто значного зниження розшарувальної корозії в сплаві В95, що свідчить про покращення його корозійної стійкості. В обох модифікованих сплавах не спостерігалася міжкристалітна корозія, а корозійне розтріскування основного металу було відсутнє протягом 60 днів випробувань. Результати випробувань свідчать про підвищення корозійної стійкості після модифікування.

Ключові слова: алюмінієві сплави, корозійна стійкість, модифікування сплавів, порошковий карбід, фізико-механічні властивості, корозійні випробування

Ткачов Юрій Валентинович – канд. техн. наук, доц., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Носова Тетяна Валеріївна – канд. техн. наук, доц., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Дніпро, Україна.

Калінін Олександр Васильович – канд. техн. наук, наук. співробітник, Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, Дніпро, Україна.

Yurii Tkachov – Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1556-2463>.

Tetiana Nosova – Cand.Sc., Assoc.Prof., Oles Honchar Dnipro National University: Dnipro, UA. ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-1591-8811>.

Oleksandr Kalinin – Cand.Sc., Researcher, Prydniprov'ska State Academy of Civil Engineering and Architecture: Dnipro, UA. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3597-158X>.

В.Л. Коваленко, В.В. Радченко, Н.О. Міняйло,

А.А. Єрофєєва, В.В. Артемчук, В.Л. Прихно

НОРМУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ПРИЧИНИ ЇХ ВІДХИЛЕННЯ ВІД ВСТАНОВЛЕНИХ НОРМАТИВІВ

Анотація. Метою роботи є комплексне дослідження питань нормування та забезпечення якості електроенергії в умовах сучасних викликів, зокрема активної інтеграції розподілених джерел енергії, мікромереж, електромобільності та широкого використання силової електроніки. Стаття спрямована на систематизацію існуючих нормативних вимог до показників якості електропостачання та виявлення основних причин відхилення цих показників від стандартів.

Методика. У роботі використано метод критичного аналізу міжнародних та національних стандартів (EN 50160, IEEE 1159, IEEE 519, IEC 61000), а також огляд наукових праць і практичних кейсів щодо виявлення, класифікації та компенсації збурень у параметрах якості електроенергії. Здійснено узагальнення типових PQ-порушень, їхніх причин і засобів запобігання.

Результати. Наведено перелік ключових показників якості електроенергії (частота, напруга, флікер, гармоніки, несиметрія, короткочасні події), їхні допустимі значення згідно зі стандартами та особливості контролю у сучасних мережах. Описано фізичні причини порушень якості – аварії, вплив нелінійних навантажень, пуски двигунів, зміна навантаження, погодні явища. Проаналізовано вплив новітніх технологій (DG, ВДЕ, EV charging) на PQ.

Наукова новизна. Запропоновано цілісний підхід до аналізу нормативно-технічного забезпечення якості електроенергії, який враховує сучасні тенденції в енергетиці. Вперше в одному дослідженні узагальнено як нормативні аспекти, так і практичні фактори впливу на PQ з деталізацією механізмів їх виникнення.

Практичне значення. Отримані результати можуть слугувати основою для оновлення локальних нормативів, покращення систем моніторингу, впровадження інтелектуальних засобів компенсації збурень, а також для навчання персоналу енергетичних компаній у сфері управління якістю енергії.

Ключові слова: якість електроенергії, PQ-норми, стандарти IEEE, EN 50160, гармонічні спотворення, флікер, розподілена генерація, мікромережі, компенсація, енергетичні стандарти.

Вступ. Якість електричної енергії (power quality, PQ) є критично важливим показником ефективності та надійності енергосистеми. Під якістю електроенергії

розуміють відповідність параметрів напруги та струму встановленим нормам за частотою, амплітудою, формою сигналу та симетрією трифазної системи. Забезпечення належної якості живлення набуває особливого значення в сучасних умовах стрімкого розвитку силової електроніки, розподіленої генерації та чутливих споживачів електроенергії [1, 2]. Зниження якості електроенергії може призводити до збоїв у роботі промислового обладнання, втрати даних, передчасного виходу з ладу техніки та значних економічних збитків. За оцінками дослідників, сумарні річні втрати від проблем з якістю електроенергії складають \$119–188 млрд у США та близько €150 млрд у країнах ЄС [2]. Відтак, нормування показників якості електроенергії покликане регламентувати допустимі відхилення параметрів напруги та струму з метою забезпечення надійного електропостачання споживачів.

Протягом останніх п'яти років опубліковано значну кількість наукових праць, присвячених проблемам якості електроенергії, розвитку стандартів та методів поліпшення PQ. Дослідники всебічно аналізують міжнародні стандарти з якості енергопостачання та пропонують шляхи їх удосконалення у контексті новітніх викликів енергосистем [3].

Зокрема, проведено критичний аналіз чинних нормативів для розподільчих мереж і мікромереж на постійному струмі [3], а також тенденцій гармонізації національних стандартів із міжнародними рекомендаціями [3,1]. В оглядовій роботі [3] наведено узагальнення основних міжнародних стандартів PQ (таких як IEEE 519-2014, EN 50160 та серія ІЕС 61000), а також рішення для забезпечення дотримання цих норм у промислових мережах. Підкреслено, що кожна із зацікавлених сторін – постачальники електроенергії, виробники обладнання та споживачі – мають виконувати свої нормативні зобов'язання для підтримання належної якості напруги [3]. Однак деякі дослідження відзначають недостатню конкретизацію обов'язків сторін у наявних стандартах та потребу в детальнішому визначенні вимог до якості живлення [3]. Так наприклад в роботі [1] автори наголошують, що нормативне забезпечення якості електроенергії є першим кроком до розв'язання проблем PQ в сучасних електричних системах, де зростає частка дестабілізуючих факторів [1].

Актуальною темою останніх років є вплив новітніх технологій на якість електроенергії. Зокрема, інтеграція розподілених джерел енергії (сонячних і вітрових електростанцій, систем накопичення) та зарядних станцій електромобілів призводить до появи нестабільностей напруги, гармонічних спотворень і флікеру у розподільчих мережах [1, 4]. Згідно інформації роботи [5], основними викликами для якості електроенергії в мережах із децентралізованою генерацією є коливання напруги, дисбаланс фаз та зростання рівня гармонік [5, 4]. Автори [6] у своєму огляді окремо розглядають проблематику PQ у мікромережах: відсутність інерції, супергармоніки від силових перетворювачів, а також адекватність існуючих стандартів для таких систем [6, 7]. Водночас значна частина досліджень присвячена розробці методів моніторингу та ідентифікації порушень PQ. Розвиваються системи автоматичного виявлення та класифікації збурень на основі штучного інтелекту – нейронних мереж,

методів глибокого навчання, вейвлет-аналізу тощо [3, 4]. Наприклад, автори [8] запропонували використання глибокої згорткової нейромережі для класифікації типових короткочасних PQ-подій (провалів, підвищень напруги, переривань, гармонік) із високою точністю. Подібні роботи спрямовані на створення в реальному часі систем діагностики якості енергії для мереж Smart Grid [4]. Окремо досліджуються питання локалізації джерел порушень якості – наприклад, авторами [1] виконано огляд методів визначення місця виникнення PQ-збурень у електромережі, що дозволяє справедливо розподіляти відповідальність за погіршення якості між постачальником і споживачами.

Публікації також охоплюють широкий спектр методів підвищення якості електроенергії та компенсації відхилень. Розглядаються традиційні рішення – статичні вар компенсатори (SVC), динамічні компенсатори напруги (DVR), фільтри вищих гармонік – а також новітні інтегровані пристрої, такі як об'єднані системи управління якістю живлення (Unified Power Quality Conditioners, UPQC) [9, 10, 11]. Значний інтерес привертають активні фільтри (APF) та статичні компенсатори на основі силової електроніки (STATCOM, D-STATCOM) для одночасного придушення гармонік і підтримання напруги [12, 11]. Так, наприклад, автори [10] провели огляд, присвячений впровадженню трифазних APF/STATCOM у системах з високою проникністю відновлюваної енергії, і відзначили ефективність цих пристроїв у зниженні гармонічних спотворень та коливань напруги від сонячних і вітрових станцій. Інші дослідники зосереджені на оптимальному розміщенні і керуванні таких компенсаторів. Зокрема, в науковій праці [13] розглянуто задачу оптимального розподілу систем зберігання енергії по мережі для покращення профілю напруги і зменшення коливань потужності, досягаючи при цьому покращення показників PQ. Запропоновано також розподілені системи покращення PQ: в [14] представлена концепція розосередженого пристрою кондиціонування якості енергії для трифазних чотирипровідних мереж низької напруги. У ряді праць акцентовано використання штучного інтелекту для вдосконалення керування компенсаторами PQ – наприклад, в [15] описано застосування алгоритмів підсилюючого навчання (reinforcement learning) для адаптивного керування D-STATCOM у мікромережі, що дозволило демпфувати коливання напруги і частоти в режимі реального часу [16]. Також авторами [11] запропоновано «інтелектуальний» керований DSTATCOM, у якому регулятор на основі нейромереж дозволяє одночасно компенсувати реактивну потужність, дисбаланс і гармоніки в системі живлення.

З огляду на вищезазначені роботи можна зробити висновок, що проблема забезпечення якості електроенергії досліджується комплексно: від аналізу стандартів та нормативів – до технічних методів моніторингу і поліпшення параметрів енергії. У даній статті узагальнено сучасний стан питання нормування показників якості електроенергії та причин відхилення цих показників від нормативних. На основі аналізу літературних джерел і стандартів сформовано систематизований опис основних показників якості, їх допустимих значень та типових причин порушень. Крім того, розглянуто наявні підходи до контролю PQ і засоби компенсації, з акцентом на перспективні рішення для сучасних розподільчих мереж.

1. Нормування показників якості електроенергії. *Показники якості та їх нормативні значення.* До основних показників якості електроенергії, що нормуються стандартами, належать: відхилення частоти мережі, відхилення напруги від номіналу (довготривалі перенапруги/недонапруги), коливання напруги (флікер), короткочасні провали та підвищення напруги, несинусоїдальність напруги (гармонічні викривлення), несиметрія трифазної напруги, а також показники короткочасних перенапруг та імпульсних перешкод [17-20]. У міжнародній практиці ключові критерії якості визначені стандартами МЕК і IEEE. Європейський стандарт EN 50160 встановлює допустимі межі параметрів напруги, що постачається споживачам у мережах загального призначення. Згідно EN 50160, у нормальному режимі протягом кожного тижня 95% середніх значень параметрів повинні залишатися в заданих межах. Основні вимоги EN 50160 для мереж низької напруги такі [21, 22]: частота повинна підтримуватися з відхиленням не більше $\pm 1\%$ від номінальної (для об'єднаних енергосистем) більшу частину часу, а максимальні відхилення частоти не мають перевищувати $+4\%/-6\%$ (наприклад, для 50 Гц це приблизно 47–52 Гц) [3]; середні значення напруги 10-хвилинної витримки повинні знаходитися в межах $\pm 10\%$ від номінальної напруги $U_{ном}$; коефіцієнт несиметрії (негативна послідовність напруги) не повинен перевищувати 2% від значення позитивної послідовності; сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень напруги (THD) на шині споживача має бути не більше 8%.

Також EN 50160 наводить гранично допустимі величини для окремих гармонік напруги (наприклад, гармоніка 5 порядку – до $\sim 6\%$ тощо). Зазначені норми застосовуються для умов нормальної роботи мережі і можуть тимчасово перевищуватися при аварійних чи нестандартних ситуаціях (наприклад, екстремальні погодні умови). Важливо, що EN 50160 фактично слугує орієнтиром для енергопостачальних компаній і не завжди юридично зобов'язує їх гарантувати виконання всіх показників у будь-який момент [22]. Проте більшість європейських країн інтегрували ці вимоги у національні стандарти або правила постачання електроенергії.

Американська практика спирається на стандарти IEEE [18, 19]. Документ IEEE 1159-2019 описує категорії явищ, що впливають на якість електроенергії, та рекомендовані межі їх параметрів. Зокрема, у IEEE 1159 визначено класифікацію короткочасних змін напруги: провал напруги (Voltage Sag/Dip) – зниження ефективного значення до 0,1–0,9 у номінальних одиницях від номіналу тривалістю від 0,5 циклу до 1 хвилини; перенапруга (Swell) – підвищення напруги до 1,1–1,8 у номінальних одиницях в тому ж інтервалі часу; короткочасне зникнення живлення (Instantaneous interruption) – падіння напруги нижче 0,1 у номінальних одиницях на час до 0,5 секунди тощо. IEEE 519-2014 встановлює кількісні вимоги до рівнів гармонічних спотворень: наприклад, для розподільчих мереж низької напруги сумарний THD напруги на шинах не має перевищувати 5%, а окремі гармоніки – визначені процентні значення відносно основної гармоніки (для 3-ї та 5-ї гармонік – до $\sim 4\%$, для вищих порядків – менше). Крім того, IEEE 519 регламентує допустимі гармонічні струми, що можуть

генеруватися навантаженнями, залежно від величини короткочасної потужності (соотношення короткого замикання). Таким чином, цей стандарт охоплює вимоги як до мережі (рівень напруги), так і до споживачів (обмеження емісії гармонік з їхнього боку).

Виробники електрообладнання керуються стандартами серії ІЕС 61000 з електромагнітної сумісності (ЕМС) [3]. Зокрема, ІЕС 61000-3-2 та 61000-3-12 встановлюють граничні рівні гармонічних струмів, що генеруються обладнанням малої і середньої потужності, підключеним до мережі. Вимоги до стійкості обладнання проти PQ-порушень (наприклад, імпульсних перенапруг, провалів напруги) визначені у стандартах ІЕС 61000-4-11, 4-13 тощо. Таким чином, з боку навантажень діють дві групи норм: обмеження емісії завад у мережу і вимоги до мінімальної імунітету пристроїв щодо нестабільності параметрів живлення [3]. Це забезпечує комплексний підхід: енергопостачальники відповідають за підтримання параметрів напруги у вузлах мережі в межах норм, а споживачі – за недопущення надмірного “забруднення” мережі нелінійними струмами та за стійку роботу свого обладнання при допустимих відхиленнях напруги [1,3]

Новітні стандарти та тенденції. Останніми роками міжнародні організації працюють над оновленням нормативної бази з PQ з урахуванням розвитку Smart Grid. Так, МЕК видала технічну специфікацію ІЕС TS 62749:2020 «Оцінювання показників якості електроенергії – характеристики електрики, що постачається публічними мережами». Цей документ узагальнює досвід застосування EN 50160 та інших норм і надає рекомендації щодо уніфікації стандартів параметрів електропостачання для мереж різних рівнів напруги [20]. Він фактично є кроком до перегляду та гармонізації міжнародних вимог PQ, особливо з огляду на інтеграцію відновлюваних джерел енергії та нових навантажень (наприклад, зарядних станцій). Також триває робота в ІЕЕЕ над удосконаленнями стандартів моніторингу PQ – зокрема, ІЕЕЕ 1159 було оновлено в 2019 р. Наукова спільнота відзначає необхідність розробки окремих нормативів для мікромереж і систем постійного струму, оскільки традиційні визначення PQ (гармоніки, флікер тощо) розроблені для синхронних мереж змінного струму і не повністю враховують специфіку DC-систем [7]. На сьогодні це питання активно досліджується, але є предметом подальших стандартизаційних зусиль.

Підсумовуючи, можна зазначити, що на міжнародному рівні існує досить повна система нормативів показників якості електроенергії. Вона охоплює вимоги до постачальників (стабільність частоти та напруги, обмеження флікеру, несиметрії та гармонік на шині споживача) і до споживацького обладнання (обмеження викидів гармонік, імпульсних завад, вимоги до стійкості до провалів і імпульсів). Виконання цих норм контролюється шляхом моніторингу PQ- параметрів у мережі спеціалізованими вимірювачами класу А згідно ІЕС 61000-4-30. Дотримання стандартів забезпечує сумісність обладнання і мережі та мінімізує ризики збоїв. Нижче розглянуті причини, через які на практиці параметри якості можуть виходити за межі норм, попри наявність зазначених стандартів.

2. Причини відхилення показників якості електроенергії від нормованих.

Навіть за наявності строгих нормативів, у реальних електричних мережах часто спостерігаються відхилення параметрів електроенергії від встановлених меж. Причини цих відхилень різноманітні і пов'язані як з особливостями режимів роботи самої енергосистеми, так і з впливом навантажень. Основні види порушень якості та їх типові причини можна згрупувати наступним чином:

Довготривалі відхилення напруги. Підвищення або пониження напруги живлення понад $\pm 10\%$ від номіналу протягом тривалого часу зазвичай зумовлені змінами навантаження в мережі або неправильною роботою регулюючих пристроїв. Якщо навантаження на лінії перевищує розрахункове, виникає значний спад напруги через кінцевий опір мережі – це призводить до заниженого рівня напруги у споживачів (так звана “просадка” або недонапруга). Навпаки, при низькому завантаженні мережі напруга може підвищуватися (особливо в радіальних мережах із компенсацією реактивної потужності, де в режимі малого навантаження конденсатори спричиняють перенапругу). Такі відхилення носять квазістаціонарний характер. Додатковою причиною довготривалих перенапруг може бути неправильне налаштування регуляторів напруги трансформаторів (OLTC), коли напруга підтримується завищеною. Довготривала недонапруга часто спостерігається в кінцевих точках розгалужених сільських мереж через обмежений переріз проводів і великі падіння напруги на них.

Короткочасні провали напруги (dips/sags). Провал напруги – це різке зниження її рівня до 0,1–0,9 Уном тривалістю від кількох напівперіодів до десятків циклів. Основною причиною більшості провалів є короткі замикання (аварійні пошкодження) в електричних мережах [23]. Під час КЗ струми різко зростають, що викликає падіння напруги на реактансах системи – у результаті напруга в значній частині мережі “просідає” до усунення аварії або відключення пошкодженої ділянки. Іншим поширеним чинником є пуск великих електродвигунів. Наприклад, при прямому пуску асинхронного двигуна з великою потужністю, початковий кидок струму (може перевищувати номінальний в 6–8 разів) спричиняє суттєве просідання напруги на шинах живлення протягом кількох секунд [23]. Таким чином, запуск потужних насосів, компресорів, прокатних станів тощо нерідко супроводжується короткочасними “провалами” напруги в мережі підприємства і навіть у суміжних споживачів. До провалів напруги також можуть призводити різкі кидки навантаження – наприклад, одночасне вмикання великої кількості споживачів або комутація трансформаторів. Причиною глибоких провалів в окремі фазі іноді стають перехідні небаланси – скажімо, однофазне замикання на землю в мережі із ізольованою нейтраллю може викликати просідання напруги на здорових фазах до $\sim 58\%$ від номіналу на час до спрацьовування захисту.

Короткочасні перенапруги (swells) та імпульсні стрибки. Раптове підвищення напруги до рівня $\sim 1,1$ – $1,8$ Уном на короткий інтервал трапляється рідше, але можливі причини включають: різке зменшення навантаження або відключення великого споживача (що веде до “перепідняття” напруги генераторами та регуляторами,

інерційно налаштованими на попереднє навантаження); обрив одного із проводів нейтралі чи компенсуючого пристрою, що викликає дисбаланс фаз і перенапругу на одній із фаз. Також перенапруга може виникати після очищення (гасіння) короткого замикання, коли електромагнітні процеси призводять до перерегулювання з боку автоматичних регуляторів збудження генераторів. Імпульсні короточасні перенапруги (сплески) часто викликані грозовими перенапруженнями або комутацією індуктивних навантажень (наприклад, вимкнення довгої ЛЕП, розмагнічування трансформатора). Ці імпульси мають дуже коротку тривалість (мілісекунди і менше) і спектр високочастотних складових, тому розглядаються окремо від “повільних” перенапруг типу swell.

Флікер (коливання напруги). Флікером називають швидкі випадкові коливання рівня напруги, що спричиняють мерехтіння освітлення. Причиною флікера є коливання споживаної реактивної потужності навантаження, які призводять до відповідних коливань напруги. Класичним джерелом флікера є електрична дугова піч: під час роботи сталеплавильної печі електрична дуга поводить себе як нелінійне і нестабільне навантаження, струм дуги постійно хаотично змінюється, що зумовлює глибокі модуляції напруги на шинах живлення в діапазоні частот 5–15 Гц. Це призводить до помітного мерехтіння ламп розжарювання. Такі коливання можуть поширюватися по мережі на великі відстані. Інші приклади навантажень, що викликають флікер: зварювальні агрегати, електроприводи з різкими періодичними змінами навантаження (пресове обладнання, прокатні стани), великі шахтні підйомники тощо [24]. Навіть вітрові електростанції за певних умов можуть генерувати невеликі періодичні коливання напруги (через ефект тіней від лопатей – “флікер вітротурбіни”, однак сучасні системи управління мінімізують це). Флікер вимірюється показниками короткострокової та довгострокової помітності миготіння P_{sub} , які розраховуються за методикою ІЕС. Нормативно значення P_{sub} не повинно перевищувати 1,0 (тобто межі чутливості середнього спостерігача) для 95% інтервалів за тиждень.

Несинусоїдальність (гармонічні спотворення). Гармонічні складові напруги і струму виникають через нелінійні властивості навантажень та джерел. Сучасні електроприймачі дедалі більше містять силову електроніку (випрямлячі, інвертори, імпульсні джерела живлення), яка споживає струм несинусоїдальної форми навіть при ідеально синусоїдальній напрузі мережі. До основних генераторів гармонік у розподільчих мережах належать: випрямлячі в системах живлення електроніки (комп’ютери, телевізори, світлодіодне освітлення з імпульсними драйверами), регульовані електроприводи з перетворювачами частоти, зарядні пристрої електромобілів, джерела безперебійного живлення (UPS), а також насичені трансформатори та дугові печі [24]. Зростання частки таких нелінійних навантажень призвело до того, що рівні гармонічних спотворень у мережах помітно зросли за останні десятиліття [1]. Гармонічні струми, протікаючи через імпеданси мережі, спричиняють появу відповідних гармонік напруги на шинах. Найпоширеніші гармоніки – це 3, 5, 7 порядок у системах 50 Гц, оскільки випрямлячі на 6 імпульсів генерують в основному непарні несиметричні гармоніки. Наслідком є викривлення форми

синусоїди напруги, що може негативно впливати на роботу обладнання (перегрів двигунів і трансформаторів через вихрові струми, резонанси в мережі, помилкове спрацювання реле). Основна причина гармонік – нелінійні навантаження. У сучасних офісних та побутових мережах частка таких навантажень дуже висока (персональні комп'ютери, LED-освітлення з блоками живлення, побутова техніка з електронними компонентами). У промисловості великі внески гармонік дають перетворювачі для електроприводів (наприклад, тягові перетворювачі на електротранспорті, насосні станції з регульованим приводом, вентиляційні системи). Таким чином, “забруднення” мережі гармоніками прямо пов'язано з прогресом електроніки. Додатково, резонансні явища можуть призводити до підсилення певних гармонік: наприклад, наявність в мережі компенсуючих конденсаторів разом з індуктивністю системи може створити резонанс на частоті деякої гармоніки, викликаючи її значне зростання. Це слід враховувати при проектуванні фільтрокомпенсуючих установок.

Несиметрія напруги. Несиметричний режим (неспівпадіння амплітуд і фаз напруг трьох фаз) виникає переважно через несиметричні навантаження. В мережах низької напруги поширеною є ситуація, коли одна фаза перевантажена (багато однофазних споживачів на ній), тоді як інші – недовантажені. Це призводить до появи вектора негативної послідовності напруги (–2% чи більше від прямої послідовності) і дисбалансу струмів. Іншою причиною можуть бути неповнофазні режими та аварії – наприклад, обрив однієї фази лінії 10 кВ, при якому споживачі 0,4 кВ можуть отримувати суттєво несиметричну напругу через зв'язок фаз на трансформаторі. Несиметрія викликає нагрівання трифазних двигунів (поява струмів подвійної частоти в роторі) та зниження їхнього обертового моменту [2]. Тому стандарти (EN 50160, ГОСТ 13109 тощо) обмежують коефіцієнт несиметрії напруги. Як згадано, основна причина дисбалансу – несиметричні навантаження, зокрема, потужні однофазні споживачі, підключені до трифазної мережі (електричні залізничні лінії з живленням на одну фазу, електропечі опору та дугові печі, зварювальні апарати) [2]. Наприклад, при живленні електрифікованої залізниці (~25 кВ, 50 Гц) від загальної мережі виникає значний перекид фаз, тому застосовують спеціальні симетрувальні пристрої або двофазні трансформаторні схеми.

Підсумовуючи, внутрішні причини зниження якості електроенергії включають: динамічні процеси в енергосистемі (перехідні процеси при перемиканні і аваріях), характеристики навантажень (нестационарне або нелінійне споживання), дисбаланс споживання по фазах, а також особливості конфігурації мережі (резонансні явища, обмежена пропускна здатність). Зовнішні впливи (грози, погодні умови) теж можуть викликати імпульсні перенапруги або обриви ліній, що опосередковано веде до PQ-проблем. Різні типи порушень якості часто проявляються одночасно: наприклад, коротке замикання викличе і провал напруги (в точці, віддаленій від місця КЗ), і перехідні гармонійні спотворення, і можливий дисбаланс фаз. Тому аналіз причин має проводитися комплексно, із застосуванням засобів моніторингу.

Важливо зазначити, що енергопостачальні компанії зазвичай несуть відповідальність за системні причини порушень (наприклад, недостатню регуляцію напруги, незадовільний стан мережі, що призводить до частих аварій), тоді як споживачі відповідають за привнесені ними викривлення (гармоніки, несиметрія від їх обладнання) [1]. Проте на практиці розмежування часто утруднене. Саме тому розробляються методи локалізації джерел PQ-подій – наприклад, аналіз взаємних змін напруги і струму у точці приєднання дозволяє визначити, чи йде гармоніка від навантаження до мережі або навпаки [1].

Висновки. Забезпечення належної якості електроенергії є важливою умовою стабільного функціонування як промислових підприємств, так і побутових споживачів. У світлі сучасних трансформацій в енергетиці, пов'язаних із децентралізацією генерації, зростанням частки відновлюваних джерел, впровадженням мікромереж, зарядної інфраструктури електромобілів та широким застосуванням електронних пристроїв, проблема підтримання нормативних параметрів якості електропостачання набула особливої актуальності. Проведене дослідження дозволило не лише систематизувати чинну нормативну базу в цій сфері, а й виявити типові порушення показників якості та встановити їх найпоширеніші причини.

У статті зроблено акцент на ключових стандартах – EN 50160, IEEE 1159, IEEE 519, серії IEC 61000, які регламентують допустимі межі таких параметрів, як частота, амплітуда та симетрія напруги, коефіцієнти гармонічних спотворень, флікер, провали й перенапруги, тощо. Особливу увагу приділено їх практичному застосуванню в умовах реальних розподільчих мереж. У результаті виявлено, що в багатьох випадках параметри якості виходять за межі нормативних значень через фактори, які часто мають комплексну природу: це одночасна дія аварійних, експлуатаційних, погодних і споживацьких чинників.

Було продемонстровано, що найбільш поширеними джерелами порушень є короткі замикання, пуски потужних електродвигунів, нелінійні споживачі, фази з перевантаженням, а також вплив погодних умов. Зростання частки нелінійних навантажень у побутовому та промисловому секторі, а також активне підключення систем на основі силової електроніки сприяють підвищенню рівнів гармонік, несиметрії та флікера, що ускладнює стабільну роботу мережі.

Також у роботі проаналізовано сучасні технічні підходи до покращення показників якості електроенергії. Наведено огляд традиційних та інноваційних засобів компенсації збурень – таких як активні фільтри, статичні компенсатори, об'єднані системи керування якістю живлення, а також інтелектуальні рішення на базі штучного інтелекту. Встановлено, що застосування таких рішень дозволяє в режимі реального часу забезпечити адаптивне керування параметрами напруги, знижуючи негативний вплив динамічних навантажень і нестабільних джерел енергії.

Окрему увагу приділено питанням відповідальності різних сторін за дотримання стандартів якості – зокрема, важливості чіткого розмежування між системними порушеннями, що виникають внаслідок недосконалості мережевої інфраструктури, та споживацькими порушеннями, пов'язаними з характеристиками підключеного

обладнання. У зв'язку з цим доцільним є впровадження технологій локалізації джерел збурень, що дозволить справедливо розподіляти відповідальність і підвищить рівень прозорості в енергопостачанні.

ЛІТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Martinez, R., Castro, P., Arroyo, A., Manana, M., Galan, N., Moreno, F. S., Bustamante, S., & Laso, A. (2022). *Techniques to Locate the Origin of Power Quality Disturbances in a Power System: A Review*. Sustainability, 14(12), 7428. <https://doi.org/10.3390/su14127428>
2. Afonso, J. L., Tanta, M., Pinto, J. G. O., Monteiro, L. F. C., Machado, L., Sousa, T. J. C., & Monteiro, V. (2021). *A Review on Power Electronics Technologies for Power Quality Improvement*. Energies, 14(24), 8585. <https://doi.org/10.3390/en14248585>
3. Lumbreras, D., Gálvez, E., Collado, A., & Zaragoza, J. (2020). *Trends in Power Quality, Harmonic Mitigation and Standards for Light and Heavy Industries: A Review*. Energies, 13(21), 5792. <https://doi.org/10.3390/en13215792>
4. Li J, Liu H, Wang D and Bi T (2021) *Classification of Power Quality Disturbance Based on S-Transform and Convolution Neural Network*. Front. Energy Res. 9:708131. doi: 10.3389/fenrg.2021.708131
5. D. Razmi, T. Lu, B. Papari, E. Akbari, G. Fathi and M. Ghadamyari, "An Overview on Power Quality Issues and Control Strategies for Distribution Networks With the Presence of Distributed Generation Resources," in *IEEE Access*, vol. 11, pp. 10308-10325, 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3238685.
6. Sepasi, S., Talichet, C., & Pramanik, A. S. (2023). *Power quality in microgrids: A critical review of fundamentals, standards, and case studies*. IEEE Access, 11, 8493–8510. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3321301>
7. Van den Broeck, G., Stuyts, J., & Driesen, J. (2018). *A critical review of power quality standards and definitions applied to DC microgrids*. Applied Energy, 229, 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.077>
8. Wang, S., & Chen, H. (2019). *A novel deep learning method for the classification of power quality disturbances using a deep convolutional neural network*. Applied Energy, 235, 1126–1140. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.087>
9. Diab, M.; Abdelhamid, T.H.; Deghedie, S. *Survey of Active Power Filters Configurations*. In Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on System, Computation, Automation and Networking (ICSCA), Pondicherry, India, 6–7 July 2018; IEEE: Pondicherry, India, 2018; pp. 1–14.
10. Tareen, W.U.; Mekhilef, S.; Seyedmahmoudian, M.; Horan, B. *Active power filter (APF) for mitigation of power quality issues in grid integration of wind and photovoltaic energy conversion system*. Renew. Sustain. Energy Rev. 2017, 70, 635–655.
11. Chen, J.-H., Tan, K.-H., & Lee, Y.-D. (2022). *Intelligent Controlled DSTATCOM for Power Quality Enhancement*. Energies, 15(11), 4017. <https://doi.org/10.3390/en15114017>
12. Hafezi, H.; D'Antona, G.; Dedè, A.; Della Giustina, D.; Faranda, R.; Massa, G. *Power Quality Conditioning in LV Distribution Networks: Results by Field Demonstration*. IEEE Trans. Smart Grid 2017, 8, 418–427.

13. Das, C. K., Bass, O., Mahmoud, T. S., Kothapalli, G., Mousavi, N., Habibi, D., & Masoum, M. A. (2019). *Optimal allocation of distributed energy storage systems to improve performance and power quality of distribution networks*. Applied Energy, 252, 113468. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.113468>
14. Dovgun, V., Temerbaev, S., Chernyshov, M., Novikov, V., Boyarskaya, N., & Gracheva, E. (2020). *Distributed power quality conditioning system for three-phase four-wire low voltage networks*. Energies, 13(18), 4915. <https://doi.org/10.3390/en13184915>
15. Bagheri, M., Nurmanova, V., Abedinia, O., & Naderi, M. S. (2018). *Enhancing power quality in microgrids with a new online control strategy for DSTATCOM using a reinforcement learning algorithm*. IEEE Access, 6, 38986–38996. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2855221>
16. P. I. N. Barbalho, A. L. Moraes, V. A. Lacerda, P. H. A. Barra, R. A. S. Fernandes and D. V. Coury, "Reinforcement Learning Solutions for Microgrid Control and Management: A Survey," in IEEE Access, vol. 13, pp. 39782-39799, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3546578
17. EN 50160:2010. Voltage Disturbances Standard EN 50160-Voltage Characteristics in Public Distribution Systems; Normalization Spanish Association: Madrid, Spain, 2010.
18. IEEE Std 519-2014. (2014). *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*. IEEE Standards Association.
19. IEEE Std 1159-2019. (2019). *IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*. IEEE Standards Association. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8796486>
20. IEC TS 62749:2020. (2020). *Assessment of power quality – Characteristics of electricity supplied by public networks*. International Electrotechnical Commission.
21. CENELEC. *Voltage Characteristics of Electricity Supplied by Public Electricity Networks*; EN 50160:2010; CENELEC: Brussels, Belgium, 2010.
22. Markiewicz, H.C.D.A.; Klajn, A.W.U.o.T. Power Quality Application Guide. Voltage Disturbances. Standard EN 50160. Power Qual. Appl. Guide 2004, 5.4.2, 4–11.
23. Roger Alves de Oliveira, Bibiana Petry Ferraz, Ruth Agustini, Renato Ferraz, Roberto Chouhy Leborgne, Chapter 8 - Voltage dips caused by faults in a transmission system: a monitoring case study of a sensitive industrial consumer, Editor(s): P. Sanjeevikumar, C. Sharmeela, Jens Bo Holm-Nielsen, P. Sivaraman, Power Quality in Modern Power Systems, Academic Press, 2021, Pages 219-244, ISBN 9780128233467, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-823346-7.00006-2>.
24. <https://powerquality.blog/2022/04/08/industrial-power-quality-problems>

Received 18.02.2025.
Accepted 21.02.2025.

Standardization of power quality indicators and the causes of their deviations from established norms

The aim of this study is a comprehensive investigation into the standardization and assurance of electric power quality under modern challenges, particularly the active

integration of distributed energy resources, microgrids, electromobility, and the widespread use of power electronics. The article focuses on systematizing current regulatory requirements for power quality indicators and identifying the main causes of their deviation from established standards.

The methods. The study employs a critical analysis of international and national standards (EN 50160, IEEE 1159, IEEE 519, IEC 61000), as well as a review of scientific literature and practical case studies related to the detection, classification, and mitigation of power quality disturbances. Typical PQ issues, their root causes, and preventive measures are generalized.

Findings. The paper presents a list of key power quality parameters (frequency, voltage, flicker, harmonics, unbalance, short-term events), their permissible values according to standards, and specific monitoring features in modern power networks. It also discusses the physical causes of quality deterioration, such as faults, nonlinear loads, motor startups, load fluctuations, and weather phenomena. The impact of emerging technologies (DG, RES, EV charging) on PQ is analyzed.

The originality. A holistic approach is proposed to analyze the regulatory and technical framework of power quality, considering modern energy trends. For the first time, both normative aspects and practical influencing factors are consolidated in a single study with detailed mechanisms of their manifestation.

Practical implementation. The findings can serve as a foundation for updating local standards, improving monitoring systems, implementing intelligent compensation devices, and educating power system personnel in power quality management.

Keywords: power quality, PQ standards, IEEE standards, EN 50160, harmonic distortion, flicker, distributed generation, microgrids, compensation, energy regulations.

Коваленко Віктор Леонідович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5950-4412>.

Радченко Віталій Васильович – доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна.. E-mail: radchvv@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-6473-2524>.

Міняйло Наталія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: kafedra_autp@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-0628-5188>.

Єрофєєва Аліна Анатоліївна – кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: alinazgia@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2981-4118>.

Артемчук Віктор Васильович – доктор технічних наук, професор кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: art_vv@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-6056-5834>.

Прихно Валерія Леонідівна – старший викладач кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем Інженерного навчально-наукового інституту Запорізького національного університету, Запоріжжя, Україна. E-mail: valeria.prihno@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7834-3618>.

Kovalenko Viktor - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: victor.l.kovalenko@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-5950-4412>.

Radchenko Vitalij - Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine.. E-mail: radchvv@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0001-6473-2524>.

Miniailo Nataliia - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: kafedra_autp@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-0628-5188>.

Yerofieieva Alina - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: alinazgia@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0002-2981-4118>.

Artemchuk Viktor - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: art_vv@ukr.net; <https://orcid.org/0000-0002-6056-5834>.

Prykhno Valeriia - senior lecturer at the Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Engineering Educational and Scientific Institute, Zaporizhzhia National University, Zaporizhzhia, Ukraine. E-mail: valeria.prihno@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-7834-3618>.

ЗМІСТ

CONTENTS

Демчишин А.А., Каленюк О.С. Комп'ютерне моделювання та візуалізація поширення звукових хвиль у звуженій чвертьхвильовій трубі TQWT	3	Demchyshyn A.A., Kaleniuk O.S. Computer-aided modeling and visualization of sound waves propagation in a Tapered Quarter Wavelength Tube	3
Ганжа А.С., Антоненко С.В. Автоматизація розробки Win32 десктопних додатків: Практичні підходи і стратегії	12	Hanzha A., Antonenko S. Automation of development of Win32 desktop applications: Practical approaches and strategies	12
Ахметшина Л.Г., Єгоров А.О. Сегментація напівтонових слабкоконтрастних зображень на основі застосування нечітких перетворень типу-2	23	Akhmetshina L. G., Yegorov A.A. Segmentation of grayscale low-contrast images using fuzzy transforms of type-2	23
Бобренок В.В., Гуда А.І. Аналіз open-source засобів для захисту ресурсів у хмарних середовищах	32	Bobrenok V., Guda A. Analysis of open-source tools for protecting resources in cloud environments	32
Хом'як Т.В., Сидоренко К.В., Малієнко А.В., Мінеєв А.С. Прогнозування причин виявлення цукрового діабету методами машинного навчання	39	Khomiak T., Sydorenko K., Maliienko A., Mineyev O. Prediction causes of diabetes detection using machine learning methods	39
Островська К.Ю., Петросян Е.Х. Нейромережева модель детектування та відстеження у транспортному потоці міста	50	Ostrovskaya K.Yu., Petrosyan E.Kh. Neural network model of detection and tracking in the city traffic flow	50
Пікільняк А.В. Аналіз та обґрунтування вибору програмних засобів моделювання й автоматизованого управління системами зворотного водопостачання гірничо-збагачувальних підприємств	57	Pikilniak A.V. Analysis and justification of the selection of software tools for modeling and automated control of recirculating water supply systems in mining and processing enterprises	57

Перцев Ю.О., Коротка Л.І. Порівняльний аналіз традиційних статистичних методів та нейромережевої моделі LSTM	65	Pertsev Y., Korotka L. Comparative analysis of traditional statistical methods and the LSTM neu- ral network model	65
Шинкаренко В.І., Чигір Р.Р. Конструктивно-продукційне моделювання тривимірних фрактальних поверхонь	78	Shynkarenko V.I., Chyhir R.R. Constructive-synthesizing modelling of three-dimensional fractal surfaces	78
Тонкошкур О.С. Щербак А.Є. Додаток для обробки та аналізу даних вимірювань концентраційної залежності діелектричної проникності двокомпонентних композитів	89	Tonkoshkur A.S. Shcherbak A.Ye. Application for data processing and analysis of measurement data of the concentration-dependent dielectric permittivity of two-component composites	89
Твердоступ М.І. Аналіз розгортуючого перетворюва- ча індуктивності в послідовність імпульсів на інтегральному таймері NE555	97	Tverdostup N.I. Analysis of deploying inductance- to-pulse sequence converter on NE555 integrated time	97
Пономарьов І.В. Розробка веб-додатку з надання послуг через володіння NFT	102	Ponomarev I.V. Development of a web application for providing services through NFT ownership	102
Спирінцев В.В., Спирінцева О.В., Генчук О.С. Дослідження можливостей платформи node.js при розробці проксі-серверів з урахуванням сучасних вимог до продуктивності та стабільності	107	Spiritsev V.V., Spirintseva O.V., Henchuk O.S. Exploring the possibilities of the node.js platform in the development of proxy servers, taking into account modern requirements for performance and stability	107
Богза М., Бірюков Д. Модель системи теплозабезпечення будинку із використанням теплонасосної установки	117	Bogza M., Biryukov D. Development of a complex model of heat supply of a house based on a heat pump in the Simulink environment	117

Гуда О.В., Генсіцька-Антонюк Н.О., Сухомлинова О.В. Вплив інтерактивних методів навчання на засвоєння математичних знань і	127	Huda O., Hensitska-Antoniuk N., Sukhomlynova O. Influence of interactive teaching methods on mathematical knowledge acquisition	127
Пеня О.Р., Сулема Є.С. Імовірнісний метод порівняння нечітких чисел	139	Penia O., Sulema Ye. Probabilistic method of fuzzy number comparison	139
Песчанський В.Ю., Сулема Є.С. Архітектурні принципи забезпечення верифікації та якості системи створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів	150	Peschanskii V.Yu., Sulema E.S. Architectural principles for ensuring verification and quality in systems for creating digital twins of biomedical objects	150
Соломатін В.А., Байбуз О.Г. Застосування моделі EfficientNet для виявлення ішемічної хвороби серця (ІХС)	160	Solomatin V.A., Baybuz O.G. Application of the EfficientNet model for detection ischemic heart disease (IHD)	160
Ткачов Ю.В., Носова Т.В., Калінін О.В. Підвищення корозійної стійкості алюмінієвих сплавів Al-Zn-Mg-Cu шляхом модифікування порошковим карбідом титану	166	Tkachov Y.V., Nosova T.V., Kalinin O.V. Enhancing the corrosion resistance of Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys through modification with titanium carbide powder	166
Коваленко В.Л., Радченко В.В., Міняйло Н.О., Єрофєєва А.А., Артемчук В.В., Прихно В.Л. Нормування показників якості електроенергії та причини їх відхилення від встановлених нормативів	177	Kovalenko V., Radchenko V., Miniailo N., Yerofieieva A., Artemchuk V., Prykhno V. Standardization of power quality indicators and the causes of their deviations from established norms	177

РЕФЕРАТИ

УДК 004.94:534

Демчишин А.А., Каленюк О.С. **Комп'ютерне моделювання та візуалізація поширення звукових хвиль у звуженій чвертьхвильовій трубі TQWT** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.3 – 11.

Моделювання та візуалізація поширення хвиль у середовищі із звуковідбиваючими елементами є важливим напрямком галузі комп'ютерних наук та обчислювальної математики. В роботі розглядається розробка алгоритмічної бази моделювання поширення звукових хвиль в акустичній системі у вигляді звуженої чвертьхвильової труби (TQWT). В основу комп'ютерного моделювання покладено алгоритм розрахунку поширення акустичної хвилі на основі диференційного рівняння з атенюацією, що дозволило розрахувати конструктивну та деструктивну інтерференцію хвилі, яка породжується лицьовою стороною динаміка, із хвилею, що виходить з порту акустичної системи. При розмірах сітки 512 x 288 швидкодія алгоритму склала більше 75 часових кроків за секунду з використанням процесору із паралельним обчисленням Intel UHD 630. В результаті роботи отримано мапи поширення хвиль у прямій та складеній звуженій трубі акустичної системи. Встановлено на основі мап, що зони акустичного збудження розташовуються всередині акустичного оформлення навпроти джерела хвиль. Показано, що акустичне оформлення у вигляді складеної звуженої чвертьхвильової труби ефективно тамує високі та середні частоти за рахунок затримки хвилі конфігурацією стінок позаду широкосмугового джерела, що усуває непередбачуване підсилення або атенюацію вказаних частот та, як наслідок, збільшує достовірність відтворення сигналу.

Бібл.9.

УДК 004.42

Ганжа А.С., Антоненко С.В. **Автоматизація розробки Win32 десктопних додатків: Практичні підходи і стратегії** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.12 – 22.

Пропонується огляд сучасних підходів до автоматизації розробки Win32 десктопних додатків з використанням практик DevOps. Описуються ключові етапи, такі як Continuous Integration (CI) та Continuous Deployment (CD), які допомагають розробникам автоматизувати збірку, тестування та розгортання додатків, знижуючи ризики помилок. Особлива увага приділяється автоматизованому тестуванню, яке включає модульні тести, функціональні тести та тести продуктивності для забезпечення стабільності додатків. Розглядаються підходи до інфраструктури як коду (IaC), які дозволяють автоматизувати налаштування та керування середовищами розробки. Серед інструментів виділяються Terraform, Ansible, та PowerShell DSC. Також включено розгляд збереження документів у хмарному сховищі з використанням Minio, що забезпечує безпечне та масштабоване зберігання даних. Завдяки цим практикам та інструментам, розробка Win32 десктопних додатків стає більш ефективною, надійною та швидкою.

Бібл.13, іл.0, табл.0.

УДК 004-93

Ахметшина Л.Г., Єгоров А.О. **Сегментація напівтонових слабкоконтрастних зображень на основі застосування нечітких перетворень типу-2** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.23 – 31.

В роботі запропоновано алгоритм сегментації напівтонових зображень на основі ітеративного застосування нечітких перетворень типу-1 та типу-2, що забезпечує необхідну деталізацію результуючих зображень для візуального аналізу, запобігаючи при цьому передеталізації, має невелику кількість керуючих параметрів, та, на відміну від алгоритмів нечіткої кластеризації типу FCM, не використовує матрицю центроїдів, що спрощує розрахунки. Наведено експериментальні результати на прикладі сегментації запропонованим алгоритмом реальних напівтонових медичних зображень.

Бібл. 10, іл. 5.

УДК 004.75:004.42

Бобренок В.В., Гуда А.І. **Аналіз open-source засобів для захисту ресурсів у хмарних середовищах** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.32 – 38.

Розглядаються наступні open source засоби для захисту хмарних середовищ: Checkov, Falco, Keycloak. Аналізуються їх переваги та недоліки. На основі цього робиться висновок щодо необхідності створення більш досконалих інструментів.

Бібл. 6, іл. 0, табл. 0.

УДК 004.89

Хом'як Т.В., Сидоренко К.В., Малієнко А.В., Мінеєв А.С. **Прогнозування причин виявлення цукрового діабету методами машинного навчання** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1 (156). - Дніпро, 2025. - С.39 - 49.

Проведено аналіз факторів та причин, що впливають на ризик розвитку цукрового діабету. Зроблено прогнозування методами машинного навчання – Decision Tree, Random Forest, k-NN та Ada Boost. Наведено аналіз отриманих результатів, оцінено точність використаних методів. Отримані результати дозволять виявляти значно більшу кількість випадків діабету до появи, раннє та ефективне лікування, зменшення витрат на медичне обслуговування.

Бібл. 6, іл. 4, табл. 6.

УДК 004.032:681.518

Островська К.Ю., Петросян Е.Х. **Нейромережева модель детектування та відстеження у транспортному потоці міста** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.50 – 56.

В роботі проведено опис предметної галузі, а саме опис методів машинного навчання та нейронної мережі, а також завдання класифікації. Крім вищепереліченого було проведено огляд наукової літератури та аналогів та опис сімейства нейромережевих моделей YOLOv7.

Реалізовано нейромережну модель для детектування та трекінгу електросамокатів у транспортному потоці. Модель була навчена на зібраному наборі даних. Також було реалізовано веб-додаток для демонстрації роботи нейромережевої моделі. Веб-додаток повністю відповідає функціональним та нефункціональним вимогам.

Бібл. 6, іл. 8, табл. 0.

УДК 004.42:628.1: 681.5

Пікільняк А.В. Аналіз та обґрунтування вибору програмних засобів моделювання й автоматизованого управління системами зворотного водопостачання гірничо-збагачувальних підприємств // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.57 – 64.

У статті проведено аналіз програмних засобів для моделювання та автоматизованого управління системами зворотного водопостачання гірничо-збагачувальних підприємств. Дослідження актуальне через необхідність оптимізації очищення та повторного використання води. Визначено найбільш придатні програмні інструменти для моделювання гідродинамічних і технологічних процесів. Застосовано методи системного аналізу, порівняльного та експертного оцінювання. Виявлено переваги й недоліки розглянутих платформ, що дозволяє надати рекомендації щодо їх використання в проектуванні та експлуатації систем зворотного водопостачання.

Бібл. 11, табл. 1.

УДК 004.4: 004.94

Перцев Ю.О., Коротка Л.І. Порівняльний аналіз традиційних статистичних методів та нейромережевої моделі LSTM // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.65 – 77.

У статті проведено порівняльний аналіз традиційних статистичних підходів (ARIMA, SARIMA) та сучасної методики на основі глибокого навчання (LSTM) для прогнозування часових рядів у фінансовій сфері. Дослідження зосереджено на оцінці ефективності кожної моделі у передбаченні ціни закриття акцій компанії Apple (NASDAQ: AAPL) за період з 01.01.2023 по 20.01.2025 року, використовуючи дані, отримані через сервіс ufinance.

Результати дослідження свідчать, що модель LSTM забезпечує найточніше прогнозування завдяки здатності найкраще виявляти складні патерни у часових рядах. SARIMA також показала високу продуктивність, особливо у випадках із вираженою сезонною компонентою, перевершуючи ARIMA за точністю. Водночас ARIMA виявилася найменш ефективною через обмежену здатність адаптуватися до сезонних коливань та нелінійних взаємозв'язків.

Отримані результати можуть бути корисними для аналітиків, інвесторів та дослідників у сфері фінансового прогнозування. У статті наведено практичні рекомендації щодо вибору моделі залежно від характеристик даних та цілей прогнозування, а також розглянуто переваги та недоліки кожного підходу.

Бібл. 15, іл. 8, табл. 2.

УДК 004.4+519.7

Шинкаренко В.І., Чигір Р.Р. **Конструктивно-продукційне моделювання тривимірних фрактальних поверхонь** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.78 – 88.

Представлено модель та програмне забезпечення для конструктивного моделювання фрактальних тривимірних поверхонь. Розроблено програмний додаток для попередньої підготовки поверхонь. Моделювання виконується засобами конструктивно-продукційного підходу. Основні процеси конструктивно-продукційного моделювання з застосуванням розроблених програмних засобів продемонстровано на прикладі моделей пагод. Використано різні види конструкторів, розроблено мультиконструктор формування тривимірних фрактальних фігур на основі мультисимвольних граматик.

Бібл. 10, іл. 11.

УДК 004.9:537.226:620.22

Тонкошкур О.С. Щербак А.Є. **Додаток для обробки та аналізу даних вимірювань концентраційної залежності діелектричної проникності двокомпонентних композитів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.89 – 96.

У статті представлено обчислювальну програму для обробки та аналізу даних залежності діелектричної проникності від концентрації у двокомпонентних композитах. Програма використовує відомі теоретичні моделі, такі як модель Бругемана-Ханаї для матричних систем та Ботчера-Хсу – для статистичних сумішей, при класифікації типу структури композитів за їх діелектричними властивостями. Розроблена в Mathcad та Visual Studio, програма обробляє експериментальні дані, обчислює параметри моделей та візуалізує результати.

Бібл. 29, іл. 1.

УДК 621.373–187.4

Твердоступ М.І. **Аналіз розгортуючого перетворювача індуктивності в послідовність імпульсів на інтегральному таймері NE555** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.97 – 101.

Проаналізовано особливості побудови перетворювача індуктивного опору на основі інтегрального таймера. Знайдено умови лінійного перетворення індуктивного опору в послідовність прямокутних імпульсів.

Бібл. 2, іл. 4.

УДК 004.415.2

Пономарьов І.В. **Розробка веб-додатку з надання послуг через володіння NFT** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.102 – 106.

Розглянуто рішення для створення веб-додатку з використанням NFT для управління підписками на інформаційні послуги. Запропоновано трирівневу архітектуру додатку, що включає клієнтський, серверний та блокчейн-рівні. Використання стандарту

ERC721 для створення смарт-контрактів забезпечує унікальність, прозорість і безпеку токенів. Описано функції карбування токенів, продовження підписок та інтеграцію з Ethereum через бібліотеку web3.js.

Показано переваги системи, зокрема захист даних, фінансову незалежність завдяки криптовалютам і масштабованість. Зазначено можливість застосування додатку для надання доступу до курсів, медіаконтенту та програмного забезпечення.

Бібл. 3.

УДК 004.7

Спірінцев В.В., Спірінцева О.В., Генчук О.С. **Дослідження можливостей платформи node.js при розробці проксі-серверів з урахуванням сучасних вимог до продуктивності та стабільності** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.107 – 116.

Досліджено можливості платформи Node.js до розробки проксі-сервера з використанням асинхронного підходу, описано процес створення власної реалізації проксі-сервера, включаючи архітектурні рішення та використані модулі. Здійснено тестування продуктивності в програмі FOGLDN Proxy Tester запропонованого рішення, результати якого порівняно із показниками інших популярних реалізацій Squid Proxy та Tinyproxy.

Бібл.6, іл. 8, табл. 2.

УДК 681.58

Богза М., Бірюков Д. **Модель системи теплозабезпечення будинку із використанням теплонасосної установки** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.117 – 126.

У статті представлено динамічну модель системи теплозабезпечення будинку на основі теплонасосної установки (ТНУ), розроблену в середовищі MATLAB Simulink із використанням блоків Simscape для моделювання теплових процесів. Актуальність дослідження підкреслюється необхідністю скорочення використання викопного палива, що підвищило попит на енергоефективні технології та системи, засновані на відновлюваних джерелах енергії. Оптимізація таких систем є критично важливим завданням у контексті глобальних зусиль щодо підвищення енергоефективності будівель.

Бібл.16.

УДК 378.22

Гуда О.В., Генсіцька-Антонюк Н.О., Сухомлинова О.В. **Вплив інтерактивних методів навчання на засвоєння математичних знань** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.127 – 138.

Метою дослідження було оцінити доцільність та ефективність інтерактивних методів у навчанні математики у закладах вищої освіти. Дослідники приділили увагу таким методам, як групові дискусії, рольові ігри, мультимедійні технології та проєктна діяльність. Результати підтвердили, що ці методи не лише покращують засвоєння математичних знань, а й сприяють розвитку практичних навичок, критичного мислення та глибокого аналізу матеріалу. Дослідження обґрунтувало впровадження методу компетентнісних співвідношень для оцінки інтерактивного навчання. Цей метод базується на

п'яти компонентах: змістовному, практичному, логіко-структурному, технологічному та інформаційному, що дозволяє проводити глибокий аналіз ефективності навчання. На основі дослідження сформовано рекомендації щодо застосування цифрових платформ і мультимедійних технологій для індивідуалізації навчання, що підтверджує їх ефективність у підвищенні якості математичної освіти відповідно до сучасних професійних вимог.

Бібл. 15, іл. 3., табл. 1

УДК 004.9

Пеня О.Р., Сулема Є.С. **Імовірнісний метод порівняння нечітких чисел** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.139 – 149.

Розглядається новий метод порівняння нечітких чисел з урахуванням довірчої імовірності, яка обирається дослідником. Наводиться огляд існуючих методів впорядкування нечітких значень, пропонується новий метод, розглядається приклад його використання та порівняння результатів із іншими методами. Пропонується операційна семантика операторів або функцій, що реалізують запропонований метод в програмному забезпеченні.

Бібл. 16, іл. 4, табл. 1.

УДК 004.4 : 004.94

Песчанський В.Ю., Сулема Є.С. **Архітектурні принципи забезпечення верифікації та якості системи створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.150 – 159.

У статті розглядаються архітектурні принципи забезпечення верифікації та якості систем створення цифрових двійників медико-біологічних об'єктів. Особливу увагу приділено питанням модульності та ізоляції компонентів, що дозволяє покращити тестування та спрощує виявлення помилок. Описано використання автоматизації тестування для швидкої верифікації змін у системі, зокрема через використання контейнерів Docker для ізоляції середовищ розробки, тестування та продакшн-середовищ. Розглянуто мікросервісну архітектуру, яка сприяє незалежному тестуванню та розгортанню компонентів системи. Окрім цього, висвітлено методології тестування на основі моделі, інтеграційного тестування та тестування в реальному часі.

Бібл. 13.

УДК 004.932.72'1:519.688

Соломатін В.А., Байбуз О.Г. **Застосування моделі EfficientNet для виявлення ішемічної хвороби серця (ІХС)** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.160 – 165.

У даній статті розглядається модель нейронної мережі яка сприяє ранньому виявленню ішемії захворювання серця на рентгенівських знімках, яка відіграє важливу роль у діагностиці та лікуванні серцево-судинних захворювань. У цій статті пропонується

дослідження, присвячене застосуванню згорткових нейронних мереж (ЗНМ) для автоматичного виявлення ішемічних захворювань серця на рентгенівських знімках.

Бібл. 10.

УДК 669.2+620.3

Ткачов Ю.В., Носова Т.В., Калінін О.В. **Підвищення корозійної стійкості алюмінієвих сплавів Al-Zn-Mg-Cu шляхом модифікування порошковим карбідом титану** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.166 – 176.

Покращення характеристик промислових сплавів, зокрема їх корозійної стійкості, є актуальним завданням як для металургів, так і для фахівців із матеріалознавства. Впровадження нових технологій та вибір матеріалів для специфічних умов експлуатації стимулюють розробку технологічних методів зміни характеристик вихідних сплавів. Дослідження та впровадження нових ефективних модифікаторів і технологій модифікування є важливим напрямком досліджень. За певних умов експлуатації алюмінієві сплави, зокрема системи Al-Zn-Mg-Cu, піддаються значним корозійним впливам, що негативно позначається на їх механічних характеристиках і довговічності. Отже, проблема полягає в необхідності розробки нових підходів та технологій.

Бібл. 20.

УДК 620.91

Коваленко В.Л., Радченко В.В., Міняйло Н.О., Єрофєєва А.А., Артемчук В.В., Прихно В.Л. **Нормування показників якості електроенергії та причини їх відхилення від встановлених нормативів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 1(156). – Дніпро, 2025. – С.177 – 189.

Метою роботи є комплексне дослідження питань нормування та забезпечення якості електроенергії в умовах сучасних викликів, зокрема активної інтеграції розподілених джерел енергії, мікромереж, електромобільності та широкого використання силових електроніки. Стаття спрямована на систематизацію існуючих нормативних вимог до показників якості електропостачання та виявлення основних причин відхилення цих показників від стандартів.

Бібл. 24.

UDC 004.94:534

Demchyshyn A.A., Kaleniuk O.S. **Computer-aided modeling and visualization of sound waves propagation in a Tapered Quarter Wavelength Tube** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.3 – 11.

The paper presents the algorithmic basis for computer-aided modeling of sound wave propagation in an acoustic system with an acoustic design in the form of a straight and folded tapered quarter wavelength tube (TQWT). The aim of the modeling is to compare the systems by fidelity of the signal reproduced and localize acoustic excitation zone inside the acoustic system, where installation of a layer of absorbing material is effective for control of wave propagation.

The computer-aided modeling of acoustic wave propagation utilizes an algorithm based on a hyperbolic differential equation with attenuation component. A web application has been developed in JS programming language for CPU and GLSL ES language for parallel computing on GPU, which works according to the presented algorithm to simulate the wave propagation process. The program visualizes wave propagation in real-time based on the initial parameters of the environment, such as: the geometric configuration of acoustic enclosure (constructed using line segments), the coordinates of the location and geometric configuration of the wave source, angular velocity of the generator and the wave amplitude, the Courant number, the attenuation coefficient, the size of the simulation grid.

The software made it possible to calculate the constructive and destructive interference maps of the wave generated by the speaker's front side with the wave emerging from the acoustic system's port of straight and folded tapered pipe. With a grid size of 512 x 288, the algorithm achieved a processing speed of over than 75 time-steps per second using a processor with parallel computing Intel UHD 630. The maps showed that the zones of acoustic excitation were located inside the acoustic enclosure opposite to the wave source. It is shown that the acoustic enclosure in the form of a folded TQWT effectively suppresses high and medium frequencies by attenuating the wave with the configuration of the walls behind the broadband source. The configuration prevents unpredictable amplification or attenuation of the specified frequencies and, as a result, increases the fidelity of signal reproduction.

Ref.9, Fig. 2.

УДК 004.42

Hanzha A., Antonenko S. **Automation of development of Win32 desktop applications: Practical approaches and strategies** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.12 – 22.

Provides an overview of current approaches to automating the development of Win32 desktop applications based on DevOps practices. Key stages are described, such as Continuous Integration (CI) and Continuous Deployment (CD), which help retailers automate the collection, testing and development of additives, and reducing the risk of problems. Particular attention is paid to automated testing, which includes unit tests, functional tests and productivity tests to ensure the stability of applications. Approaches to infrastructure as code (IaC) are considered, which allow automating the setup and processing of development cores. The tools include Terraform, Ansible, and PowerShell DSC. Also included is a document saving feature with the Minio software, which ensures safe and scalable data saving. Thanks to these

practices and tools, the development of Win32 desktop add-ons becomes more efficient, reliable and reliable.

Bibl.13, pict. 0, tabl. 0.

UDC 004-93

Akhmetshina L. G., Yegorov A.A. **Segmentation of grayscale low-contrast images using fuzzy transforms of type-2** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.23 – 31.

The paper proposes the algorithm of grayscale images segmentation based on the iterative application of type-1 and type-2 fuzzy transformations, which provides the necessary detailing of the resulting images for visual analysis, while avoiding over-detailing, has a small number of control parameters, and, unlike FCM type fuzzy clustering algorithms, doesn't use the matrix of centroids, which simplifies calculations. Experimental results are presented on the example of real grayscale medical images segmentation by the proposed algorithm.

Ref. 10, fig. 5.

UDC 004.75:004.42

Bobrenok V., Guda A. **Analysis of open-source tools for protecting resources in cloud environments** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.32 – 38.

The following open source tools for protecting cloud environments are considered: Checkov, Falco, Keycloak. Their advantages and disadvantages are analyzed. Based on this, a conclusion is made about the need to create more advanced tools.

Bibl. 6, ill. 0, tab. 0.

UDC 004.89

Khomiak T., Sydorenko K., Maliienko A., Mineyev O. **Prediction causes of diabetes detection using machine learning methods** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.39 – 49.

На analysis factors and causas, що впливає на ризик розвитку diabetes був conducted. Предпосылки были сделаны с помощью технических методов обучения - Политика Tree, Random Forest, k-NN и Ada Boost. На analysis of obtained results was presented, and the accurate of used methods was assessed. Результаты ограничиваются для снижения значительного числа случаев диабетов до его свидетельства, ранних и эффективных изменений, и снижения медицинских средств.

Bibl. 6, ill. 4, tab. 6.

UDC 004.032:681.518

Ostrovskaya K.Yu., Petrosyan E.Kh. **Neural network model of detection and tracking in the city traffic flow** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.50 – 56.

The paper describes the subject area, namely the description of machine learning methods and neural networks, as well as the classification task. In addition to the above, a review of scientific literature and analogues and a description of the YOLOv7 family of neural network models were conducted.

A neural network model was implemented for detecting and tracking electric scooters in the traffic flow. The model was trained on the collected data set. A web application was also implemented to demonstrate the operation of the neural network model. The web application fully meets the functional and non-functional requirements.

Bibl. 6, Fig. 8, Table 0.

UDC 004.42:628.1:681.5

Pikilniak A.V. **Analysis and justification of the selection of software tools for modeling and automated control of recirculating water supply systems in mining and processing enterprises** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.57 – 64.

The article presents an analysis of software tools for modeling and automated control of recirculating water supply systems in mining and processing enterprises. The research is relevant due to the need to optimize water treatment and reuse processes. The most suitable software tools for modeling hydrodynamic and technological processes are identified. System analysis methods, comparative and expert evaluations were applied. The advantages and disadvantages of the considered platforms are revealed, providing recommendations for their use in the design and operation of recirculating water supply systems.

Bibl. 11, Table 1.

UDC 004.4: 004.94

Pertsev Y., Korotka L. **Comparative analysis of traditional statistical methods and the LSTM neural network model** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.65 – 77.

This paper presents a comparative analysis of traditional statistical methods (ARIMA, SARIMA) and a modern deep learning approach (LSTM) for financial time series forecasting. The study focuses on evaluating the efficiency of each model in predicting the closing price of Apple Inc. (NASDAQ: AAPL) stock. These models were selected due to their widespread use in financial analysis: ARIMA is suitable for stationary time series, SARIMA accounts for seasonal variations, and LSTM excels at capturing nonlinear dependencies and long-term trends.

Bibl. 15, Fig. 8, Table 2.

UDC 004.4+519.7

Shynkarenko V.I., Chyhir R.R. **Constructive-synthesizing modelling of three-dimensional fractal surfaces** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.78 – 88.

The model and software for constructive modelling of three-dimensional fractal surfaces are presented. A software application for preliminary preparation of surfaces is developed. The modelling is performed by principles of the constructive-synthesizing approach. The main processes of constructive- synthesizing modelling using the developed software tools are demonstrated on the example of pagoda models. Different types of constructors are used, and a multi-constructor for the formation of three-dimensional fractal shapes based on multi-character grammars is developed.

Bibl. 10, fig. 11.

UDC 004.9:537.226:620.22

Tonkoshkur A.S. Shcherbak A. Ye. **Application for data processing and analysis of measurement data of the concentration-dependent dielectric permittivity of two-component composites** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.89 – 96.

This article presents a computational application for processing and analyzing data on the concentration dependence of dielectric permittivity in two-component composites. The application uses established theoretical models, such as the Brugemann-Hanai model for matrix systems and the Bottcher-Hsu model for statistical mixtures, to classify composite structures based on their dielectric behavior.. Developed in Mathcad and Visual Studio, the soft-

ware processes experimental data, computes model parameters, and visualizes results, enhancing the efficiency and accuracy of dielectric studies.

Bibl. 29, fig.1.

UDK 621.373–187.4

Tverdostup N.I. **Analysis of deploying inductance-to-pulse sequence converter on NE555 integrated time** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.97 – 101.

The peculiarities of construction of inductive impedance converter Based on integral timer are analysed. Conditions of linear transformation of inductive impedance into a sequence of rectangular pulses are found.

Bibl. 2, ill. 4.

UDC 004.415.2

Ponomarev I.V. **Development of a web application for providing services through NFT ownership** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.102 – 106.

A solution for creating a web application using NFT to manage subscriptions to information services is considered. A three-tier architecture of the application is proposed, including client, server and blockchain levels. The use of the ERC721 standard for creating smart contracts ensures the uniqueness, transparency and security of tokens. The functions of minting tokens, renewing subscriptions and integration with Ethereum via the web3.js library are described.

The advantages of the system are shown, in particular data protection, financial independence thanks to cryptocurrencies and scalability. The possibility of using the application to provide access to courses, media content and software is indicated.

Bibl. 3.

UDC004.7

Spirintsev V.V., Spirintseva O.V., Henchuk O.S. **Exploring the possibilities of the node.js platform in the development of proxy servers, taking into account modern requirements for performance and stability** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.107 – 116.

The possibilities of the Node.js platform for the development of a proxy server using an asynchronous approach are studied, the process of creating your own proxy server implementation, including architectural solutions and used modules, is described. Performance testing of the proposed solution was performed in the FOGLDN Proxy Tester program, the results of which were compared with the performance of other popular Squid Proxy and Tinyproxy implementations.

Bibl.6, ill. 8, tabl. 2.

UDC 681.58

Bogza M., Biryukov D. **Development of a complex model of heat supply of a house based on a heat pump in the Simulink environment** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.117 – 126.

The article presents a dynamic model of a house heat supply system based on a heat pump unit (HPU) developed in the MATLAB Simulink environment using Simscape blocks to model thermal processes. The relevance of the study is emphasized by the need to reduce fossil fuel consumption, which has increased the demand for energy-efficient technologies

and systems based on renewable energy sources. Optimizing such systems is critical in the context of global efforts to improve building energy efficiency.

Bibl. 16.

UDC 378.22

Huda O., Hensitska-Antoniuk N., Sukhomlynova O. **Influence of interactive teaching methods on mathematical knowledge acquisition** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.127 – 138.

The purpose of the study was to assess the expediency and effectiveness of interactive methods in teaching mathematics in institutions of higher education. Researchers paid attention to such methods as group discussions, role-playing games, multimedia technologies and project activities. The results confirmed that these methods not only improve the assimilation of mathematical knowledge, but also contribute to the development of practical skills, critical thinking and in-depth analysis of the material. The study substantiated the implementation of the method of competence ratios for the assessment of interactive learning. This method is based on five components: substantive, practical, logical-structural, technological and informational, which allows for an in-depth analysis of the effectiveness of training. On the basis of the research, recommendations were made regarding the use of digital platforms and multimedia technologies for individualization of learning, which confirms their effectiveness in improving the quality of mathematics education in accordance with modern professional requirements.

Bible 15, fig. 3, tabl. 1.

UDC 004.9

Penia O., Sulema Ye. **Probabilistic method of fuzzy number comparison** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.139 – 149.

A new method of comparison of fuzzy numbers is proposed that considers a confidence probability chosen contextually by a researcher. Existing methods of fuzzy number comparison are reviewed, an example of a newly proposed method is provided, and results are compared with existing methods. Operational semantics of operators or functions that implement proposed method in software is considered.

Ref. 16, fig. 4, tabl. 1.

UDC 004.4 : 004.94

Peschanskii V.Yu., Sulema E.S. **Architectural principles for ensuring verification and quality in systems for creating digital twins of biomedical objects** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.150 – 159.

The article considers the architectural principles for ensuring verification and quality of systems for creating digital twins of medical and biological objects. Particular attention is paid to the issues of modularity and isolation of components, which allows improving testing and simplifying error detection. The use of test automation for quick verification of changes in the system is described, in particular through the use of Docker containers for isolating development, testing and production environments. We will consider the microservice architecture, which facilitates independent testing and deployment of system components. In addition, we will cover the methodologies of model-based testing, integration testing, and real-time testing.

Bibl. 13.

UDC 004.932.72'1:519.688

Solomatin V.A., Baybuz O.G. **Application of the EfficientNet model for detection ischemic heart disease (IHD)** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.160 – 165.

This article considers a neural network model that contributes to the early detection of ischemia of heart disease on X-ray images, which plays an important role in the diagnosis and treatment of cardiovascular diseases. This article proposes a study devoted to the use of convolutional neural networks (CNN) for the automatic detection of ischemic heart disease on X-ray images.

Bibl. 10.

UDC 669.2+620.3

Tkachov Y.V., Nosova T.V., Kalinin O.V. **Enhancing the corrosion resistance of Al-Zn-Mg-Cu aluminum alloys through modification with titanium carbide powder** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.166 – 176.

Improving the characteristics of industrial alloys, particularly their corrosion resistance, is a relevant task for both metallurgists and materials science specialists. The implementation of new technologies and the selection of materials for specific operating conditions stimulate the development of technological methods for altering the characteristics of base alloys. The investigation and application of new effective modifiers and modification technologies represent an important research direction. Under certain operating conditions, aluminum alloys, particularly the Al-Zn-Mg-Cu system, are subjected to significant corrosive influences, which negatively affect their mechanical properties and longevity. Therefore, the challenge lies in the necessity to develop new approaches and technologies.

Bibl. 20.

UDC **620.91**

Kovalenko V., Radchenko V., Miniailo N., Yerofieieva A., Artemchuk V., Prykhno V. **Standardization of power quality indicators and the causes of their deviations from established norms** // System technologies. N 1(156) - Dnipro, 2025.- P.177 – 189.

The aim of this study is a comprehensive investigation into the standardization and assurance of electric power quality under modern challenges, particularly the active integration of distributed energy resources, microgrids, electromobility, and the widespread use of power electronics. The article focuses on systematizing current regulatory requirements for power quality indicators and identifying the main causes of their deviation from established standards.

Bibl. 24.

Системні технології
ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ
Випуск 1 (156)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

Здано до набору 21.02.2025. Підписано до друку 26.02.2025.

Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.

Умов. друк арк. – 14,64. Обл.–видавн. арк. – 12,81.

Тираж 300 прим. Замовл. – 01/25

Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,
кафедра Інформаційних технологій та систем: ІВК «Системні технології»
49600, Дніпро, а/с 493

<http://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

Свідомство про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

Серія КВ № 8684 від 23 квітня 2004 рік

Редакційна колегія

Селівьорстова Тетяна Віталіївна
(головний редактор)

доцент, кандидат технічних наук

Алпатов Анатолій Петрович

Член-кореспондент НАН України,
професор, доктор технічних наук

Архипов Олександр Євгенійович

професор, доктор технічних наук

Бабічев Сергій Анатолійович

доцент, доктор технічних наук

Білозьоров Василь Євгенович

професор,

доктор фізико-математичних наук

Гече Федір Елемирович

професор, доктор технічних наук

Гуда Антон Ігорович

(заст. головного редактора)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Вікторія Володимирівна

(вчений секретар)

професор, доктор технічних наук

Гнатушенко Володимир Володимирович

професор, доктор технічних наук

Гожий Олександр Петрович

професор, доктор технічних наук

Єрьомін Олександр Олегович

професор, доктор технічних наук

Кіріченко Людмила Олегівна

професор, доктор технічних наук

Світличний Дмитро Святозарович

професор, доктор технічних наук

Скалозуб Владислав Васильович

професор, доктор технічних наук

Хандецький Володимир Сергійович

професор, доктор технічних наук

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Інститут технічної механіки

НАНУ і ДКАУ, Україна

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут» імені Ігоря
Сікорського", Україна

Jan Evangelista Purkyně University
in Ústí nad Labem

Університет імені Яна Євангеліста Пуркіне, Усті
над Лабем, Чеська Республіка

Дніпровський національний університет імені
Олеса Гончара, Україна

Ужгородський національний університет, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка», Україна

Чорноморський національний університет імені
П.Могили, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Харківський національний університет
радіоелектроніки, Україна

Akademia Górniczo-Hutnicza

Краківська гірничо-металургійна академія ім. С.
Сташіца, Польща

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» Україна

Дніпровський національний університет імені
Олеса Гончара, Україна