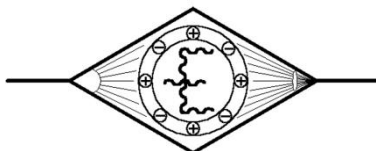


Вінницький національний технічний університет

Міністерство освіти і науки України
Академія інженерних наук України
Інститут фізики напівпровідників імені В.Є. Лашкарьова НАН України
Ужгородський національний університет
Грузинський технічний університет
Люблінський технологічний університет
Міжнародні товариства оптичної техніки SPIE, OSA



Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Заснований у 2001 році
Виходить 2 рази на рік

№ 1 (49), 2025

Свідоцтво про реєстрацію – КВ № 15295–3867Р від 22.06.2009 р.
Ідентифікатор медіа – R30-01502 (Рішення Національної ради України з питань
телебачення та радіомовлення, № 1234 від 31.10.2023 року)

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради ВНТУ, протокол № 12 від 29 травня 2025 р.

Міжнародний науково-технічний журнал «Оптико-електронні
інформаційно-енергетичні технології» є науковим виданням, публікації в
якому визнаються при захисті дисертаційних робіт з технічних наук
(постанова Президії ВАК України №1-05/6 від 12 червня 2002 року)
(повторна реєстрація, Наказ МОН України №820 від 11 липня 2016 р)

Присвоєно категорію Б в галузі технічних наук згідно з наказом МОН № 409 від 17.03.2020

Індексується та представлений у міжнародних наукометричних базах даних,
репозиторіях і пошукових системах: EBSCOhost; Academic Search

Premier; Library, Information Science & Technology Abstracts; MEDLINE; HealthSource:
Nursing/AcademicEdition; HealthSource - Consumer Edition; Regional Business News;
Google Scholar, Ukrainian Scientific Citation Index (UInCit),

«Наукова періодика України» в Національній бібліотеці України ім. В.І. Вернадського

© Вінницький національний технічний університет, оформлення, верстка, 2024

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:

Україна, 21021, м. Вінниця,
вул. Хмельницьке шосе, 95.

Тел.: +38 (0432) 51-32-56
Факс: +38 (0432) 46-57-72
<https://oeipt.vntu.edu.ua/>
E-mail: oeipts@gmail.com

**МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР:

Павлов С. В. Вінницький національний технічний університет, Україна

ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА:

Вуйцик В. Т. Технологічний Університет «Люблінська Політехніка», Польща
Осадчук В.С. Вінницький національний технічний університет, Україна
Ушенко О.Г. Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ:

Азаров О. Д. Вінницький національний технічний університет	Муравський Л.І. Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка НАН України
Ангельський О.В. Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича	Никифорова Л.Є. Національний університет біоресурсів та природокористування України, Київ
Аврун О. В. Харківський національний університет радіоелектроніки, Україна	Николайчук Я.М. Тернопільський національний економічний університет, Україна
Бобицький Я.В. Національний університет "Львівська політехніка"	Оміотек З.Б. Технологічний Університет «Люблінська Політехніка», Польща
Бунь Р.А. Національний університет "Львівська політехніка"	Осадчук О.В. Вінницький національний технічний університет
Бісікало О. В. Вінницький національний технічний університет	Петрук В.Г. Вінницький національний технічний університет
Васіленко В.Б. Новий університет Лісабону, Лісабон, Португалія	Поворознюк А.І. Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»
Васілевський О. М. Техаський університет в Остіні, США	Романюк О.Н. Вінницький національний технічний університет
Власенко О.В. Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова	Ротштейн А.П. Донецький національний університет ім. Василя Стуса
Володарський Є. Т. Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова, Київ	Русин Б.П. Фізико-механічний інститут ім. Г.В.Карпенка НАН України, Львів
Грабко В.В. Вінницький національний технічний університет	Салдан Й.Р. Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова
Заболотна Н. І. Вінницький національний технічний університет	Саченко А.О. Тернопільський національний економічний університет, Україна
Кветний Р.Н. Вінницький національний технічний університет	Смайлова С.С. Східноказахстанський технічний університет ім. Д.Серікбаєва, Оскемен, Республіка Казахстан
Коваленко В.С. НДІ лазерної техніки та технологій Національний технічний університет України "КПІ", Київ	Смолаж Анджей Технологічний Університет «Люблінська Політехніка», Польща
Колісник П.Ф. Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова	Сорокін В. М. Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАНУ, Україна
Кичак В.М. Вінницький національний технічний університет	Тітова Н.В. Національний університет "Одеська Політехніка", Одеса, Україна
Кривонос В.С. Національний авіаційний університет, Київ, Україна	Тимчик Г.С. Національний технічний університет України "КПІ", Київ
Кулаков П. І. Уманський національний університет садівництва	Тимченко Л.І. Національний транспортний університет, Київ, Україна
Кухарчук В. В. Вінницький національний технічний університет	Тужанський С.Є. Вінницький національний технічний університет
Лежнюк П.Д. Вінницький національний технічний університет	Шайко-Шайковский О. Г. Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича
Лепіх Я.І. Одеський національний університет ім. Мечникова	Шевчук В.І. Український державний науково-дослідний інститут медико-соціальних проблем інвалідності, Вінниця
Лужецький В.А. Вінницький національний технічний університет	Яровий А.А. Вінницький національний технічний університет
Литвиненко В. І. Херсонський державний університет, Україна	
Мамирбаєв О.Ж. Інститут інформаційних та обчислювальних технологій КН МОН, Алмати, Республіка Казахстан	
Мартинюк Т.Б. Вінницький національний технічний університет	
Медиковський М.О. Національний університет "Львівська політехніка"	

ВІДПОВІДАЛЬНІ СЕКРЕТАРІ:

Кожем'яко А.В. Вінницький національний технічний університет, Україна
Тужанський С.Є. Вінницький національний технічний університет, Україна
Костюкевич С.О. Інститут фізики напівпровідників НАНУ, Київ, Україна

ТЕХНІЧНІ СЕКРЕТАРІ:

Павлов В. С., Карась О.В.

РЕДАКТОРИ-КОРЕКТОРИ:

Прадівляний М.Г., Веремієнко С.Я.

**МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ЗМІСТ**

**ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Д.І. Угрин, Ю.О. Ушенко, Ю.Я. Томка, В.В. Дворжак, О.О. Кодряну Гнучка методологія ризик-менеджменту прийняття рішень стартап-проектів на основі прогнозування цін акцій.....	7
--	---

**МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ
ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ**

Ю.В. Самохін, О.Г. Аврунін Автоматизація повного циклу обробки кріомікроскопічних зображень: від збору до аналітики	20
Р.Н. Квстний, С.І. Бородкін Покращена модель регуляризації ELASTIC NET для обробки фінансових часових рядів.....	29
М.І. Кривошея Дослідження феномену подвійного спуску та порівняння мінімаксної апроксимації з L2-регуляризцією.....	36
Т.Б. Мартинюк, Д.О. Каташинський Особливості асоціативного оброблення даних в інтелектуальних системах.....	44
П.О. Яковишен, С.Є. Тужанський Адаптивний метод передавання даних у інформаційних каналах телемедичних систем.....	53
М.О. Царенко, А.Р. Партека, М.В. Лавров, Й.Й. Білинський Розробка та застосування комп'ютерної програми для оцінки якості обробки зображень на основі дослідження згорток	64
М.В. Талах, В.В. Дворжак, Ю.О. Ушенко Методи денормалізації для сховищ даних ІОТ: балансування продуктивності запитів і надлишковості даних	72
С.А. Андрікевич, С.Є. Тужанський Удосконалений метод адаптивної гістограмної еквалізації кольорових зображень очного дна.....	82

**СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА
РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ**

С.В. Хрущак, О.М. Ткаченко, І.С. Колесник Підвищення ефективності RAG для побудови наукових інтелектуальних баз знань.....	89
Д.І. Угрин, Ю.О. Ушенко, Т.В. Терлецький, О.Л. Кайдик, Ю.Г. Добровольський, К.С. Шкідіна Гнучка технологія розробки інтелектуальної системи прогнозування розвитку населення.....	98
Д.І. Угрин, Ю.О. Ушенко, Ю.Я. Томка, К.П. Газдюк, В.В. Дворжак, Д.А. Білобрицький Гнучкі методології управління ризиками в життєвому циклі інтелектуальної системи прогнозування рішень динаміки ринкових акцій.....	111
Д.І. Угрин, Ю.О. Ушенко, К.П. Газдюк, А.Я. Довгунь, А.Д. Угрин, Д.В. Козак Методологія розробки та впровадження інтелектуальної інформаційної системи прогнозування продажів для ефективного управління.....	123
Ю.Є. Поуданєн, А.В. Кожем'яко Класифікація зображень із застосуванням оптико-цифрових методів покращення якості зображень та глибокого навчання при проведенні ендоскопічних досліджень	135
Чжао Цайфен, В.М. Дубовой Дослідження методу прогнозування глибини інвазії меланоми.....	147
В.О. Копиця, Р.Н. Квстний Аналіз підходів до вдосконалення інтелектуальних технологій управління паркуванням.....	157
О.Н. Романюк, В.С. Павлов, Н.В. Тітова, С.О. Романюк, В.П. Майданюк Використання нейрогарнітур для діагностики захворювань.....	168

**МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ
ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

ЗМІСТ

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

А.В. Щербатюк, С.Є. Тужанський Метод сегментації зображень ОКТ з допомогою згорткової нейромережі.....	178
В.В. Шолота Аналіз методів підтримки прийняття рішень в системах поляризаційної інтроскопії біологічних тканин та рідин.....	185
С.М. Пашковський, Ю.О. Пилипець, С.В. Павлов, Я.І. Ярославський, О.С.Волосович Інтелектуальні системи обробки ехокардіографічних зображень для оцінки функціонального стану серця.....	193
Н.І. Заболотна Інтелектуальний метод підтримки прийняття рішення в багатопараметричній системі азимутально інваріантної Мюллер-поляриметрії при оцінюванні патологій.....	200
О.С. Корніленко, О.В.Карась Застосування штучного інтелекту для автоматизованої інтерпретації оптичних зображень сітківки при діабетичній ретинопатії.....	209
Т.В. Жемчужкіна Порівняльний аналіз точності класифікації електроміографічних сигналів за ознаками графіка різниць другого порядку для диференціювання типів болю в попереку.....	217
А.Ю. Марчук Аналіз методів та систем розпізнавання патологій вуха на отоскопічних зображеннях.....	227

**ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ
КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ**

О.В. Осадчук, Я.О. Осадчук, В.І. Петренко, В.К. Скощук, К.В. Шикун Експериментальне дослідження генератора детермінованого хаосу на основі транзисторної структури	235
О.В. Осадчук, Я.О.Осадчук, В.І. Петренко, В.К. Скощук Розробка генератора детермінованого хаосу на основі транзисторної структури з від'ємним опором.....	247

АЛЬТЕРНАТИВНІ НАУКОВІ ІДЕЇ ТА ГІПОТЕЗИ

Р.В. Слободян, І.В. Богач Проблеми процесу підтримки клієнтів та їх комплексне вирішення.....	257
--	-----

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL
“OPTOELECTRONIC INFORMATION-POWER TECHNOLOGIES”
CONTENTS

PRINCIPAL CONCEPTS AND STRUCTURAL APPROACHES TO THE THREE-LEVEL SYSTEM OF SPECIALIST TRAINING IN THE SPECIALIZATION OF “OPTOELECTRONIC INFORMATION-ENERGY TECHNOLOGIES”

D.I. Uhryn, Yu.O. Ushenko, Yu.Ya. Tomka, V.V. Dvorzhak, O.O. Kodryanu Agile risk management methodology for decision-making in startup projects based on stock price forecasting 7

OPTOELECTRONIC/DIGITAL METHODS AND SYSTEMS FOR IMAGE/SIGNAL PROCESSING

Yu.V. Samokhin, O.G. Avrunin Automation of the full cycle of cryomicroscopic image processing: from collection to analysis 20

R.N. Kvyetnyy, S.I. Borodkin Improved model of ELASTIC NET regularization for financial time series..... 29

M.I. Kryvosheia Study of the double trigger phenomenon and comparison of minimax approximation with L2-regularization..... 36

T.B. Martyniuk, D.O. Katashynskyi Peculiarities of associative data processing in intelligent systems..... 44

P.O. Yakovyshen, S.Eu. Tuzhanskyi Adaptive data transmission method in information channels of telemedicine systems..... 53

M.O. Tsarenko A.R. Parteka M.V. Lavrov, Yo.Yo. Bilynsky Development and application of a computer program for assessing the quality of image processing based on the study of convections..... 64

M.V. Talakh, V.V. Dvorzhak, Yu.O. Ushenko Denormalization techniques for IOT data warehouses: balancing query performance and data redundancy..... 72

S.A. Andrikevych, S.Yu. Tuzhanskyi Improved method of adaptive histogram equalization for color fundus images..... 82

SYSTEMS OF TECHNICAL VISION AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE, IMAGE PROCESSING AND PATTERN RECOGNITION

S.V. Khruschak, O.M. Tkachenko, I.S. Kolesnyk RAG efficiency improvement for building intellectual scientific knowledge databases..... 89

D.I. Uhryn, Yu.O. Ushenko, T.V. Terletskyi, O.L. Kaidyk, Yu.G. Dobrovolsky, K.S. Shkidina Agile technology for developing an intelligent population development forecasting system..... 98

D.I. Uhryn, Yu.O. Ushenko, Yu.Ya. Tomka, K.P. Hazdiuk, V.V. Dvorzhak, D.A. Bilobrytskyi Agile risk management methodologies in the life cycle of an intelligent system for forecasting solutions of market share dynamics..... 111

D.I. Uhryn, Yu.O. Ushenko, K.P. Hazdiuk, A.Ya. Dovhun, A.D. Uhryn, D.V. Kozak Methodology of development and implementation of an intelligent sales forecasting information system for effective inventory management..... 123

Yu.Eu. Poudanien, A.V. Kozhemiako Image classification using optical-digital image enhancement methods and deep learning in endoscopic examinations..... 135

Caifeng Zhao, V.M. Dubovoi Research on melanoma depth of invasion prediction method..... 147

V.O. Kopytsia, R.N. Kvyetnyy Analysis of approaches to improving intelligent parking management technologies..... 157

O.N. Romaniuk, V.S. Pavlov, N.V. Titova, S.O. Romaniuk, V.P. Maidanyuk Use of neuroheadsets for diagnostics of diseases..... 168

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL
“OPTOELECTRONIC INFORMATION-POWER TECHNOLOGIES”
CONTENTS

BIOMEDICAL OPTICAL AND ELECTRONIC SYSTEMS AND DEVICES

A.V. Shcherbatyuk, S.Eu. Tuzhanskyi Method of segmentation of OCT images using a convulsive neural network.....	178
V.V.Sholota Analysis of decision support methods in polarization introscopy systems of biological tissues and fluids.....	185
S.M. Pashkovskiy, Yu.O. Pylypets, S.V. Pavlov, Ya. I. Yaroslavskyy, O.S. Volosovych Intelligent echocardiographic image processing systems for assessing the functional state of the heart.....	193
N.I. Zabolotna Intellectual method of supporting decision making in a multi-parameter system of azimuthally invariant Mueller-polarimetric in pathologies assessment.....	200
O.S. Kornilenko, O.V. Karas Application of artificial intelligence for automated interpretation of optical retinal images in diabetic retinopathy.....	209
T.V. Zhemchuzhkina Comparative analysis of the accuracy of classification of electromyographic signals by second-order difference graphs for differentiating types of pain in the lower back.....	217
A.Yu. Marchuk Analysis of methods and systems for recognition of ear pathologies on otoscopic images.....	227

OPTICAL AND OPTOELECTRONIC SENSORS AND TRANSFORMERS FOR SYSTEMS OF CONTROL AND ECOLOGY MONITORING

O.V. Osadchuk, Ia.O. Osadchuk, V.I. Petrenko, V.K. Skoschuk, K.V. Shykun Experimental study of a determinative chaos generator based on a transistor structure.....	235
O.V. Osadchuk, Ia.O. Osadchuk, V.I. Petrenko, V.K. Skoschuk Development of a determinative chaos generator based on a transistor structure with negative resistance.....	247

ALTERNATIVE SCIENTIFIC IDEAS AND HYPOTHESES

R.V. Slobodian, I.V. Bogach Customer support process problems and their all-in-one resolution	257
--	-----

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

УДК 004.89

Д.І. УГРИН, Ю.О. УШЕНКО, Ю.Я. ТОМКА, В.В. ДВОРЖАК, О.О. КОДРЯНУ

ГНУЧКА МЕТОДОЛОГІЯ РИЗИК-МЕНЕДЖМЕНТУ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СТАРТАП-ПРОЄКТІВ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЦІН АКЦІЙ

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

Анотація. Стаття присвячена дослідженню проблематики ризик-управління під час прийняття рішень у стартап-проєктах, зокрема в умовах високої невизначеності та волатильності фінансових ринків. Для підвищення ефективності управління ризиками запропоновано метод прогнозування цін акцій на основі сучасних моделей машинного навчання, таких як Support Vector Regression, Random Forest і Gradient Boosting. Проведено експериментальні дослідження з використанням історичних фінансових даних, зібраних через API Yahoo Finance, які були очищені, нормалізовані та доповнені індикаторами технічного аналізу. Для оцінки точності прогнозів застосовано метрики середньоквадратичної помилки (MSE) і коефіцієнта детермінації (R^2). Експерименти продемонстрували, що використання ансамблевих моделей і технік стека забезпечує високу якість прогнозування. На основі результатів розроблено веб-додаток для інтеграції прогнозів у процес прийняття рішень у стартап-проєктах. Dodatok дозволяє інвесторам і менеджерам аналізувати ринкові тренди, оцінювати ризики та ухвалювати обґрунтовані рішення щодо інвестицій. Застосування запропонованої системи сприяє мінімізації ризиків і підвищенню стабільності фінансових результатів стартап-проєктів.

Ключові слова: ризик-управління, прийняття рішень, стартап-проєкти, прогнозування цін акцій, машинне навчання, фінансові ризики, волатильність ринку, технічний аналіз, інвестиційні стратегії.

Abstract. The article is devoted to the study of the issues of risk management during decision-making in startup projects, in particular in conditions of high uncertainty and volatility of financial markets. To improve the efficiency of risk management, a method of forecasting stock prices based on modern machine learning models, such as Support Vector Regression, Random Forest and Gradient Boosting, is proposed. Experimental studies are conducted using historical financial data collected through the Yahoo Finance API, which were cleaned, normalized and supplemented with technical analysis indicators. The metrics of mean square error (MSE) and coefficient of determination (R^2) are used to assess the accuracy of forecasts. The experiments have shown that the use of ensemble models and stack techniques provides high quality forecasting. Based on the results, a web application has been developed to integrate forecasts into the decision-making process in startup projects. The application allows investors and managers to analyze market trends, assess risks and make informed investment decisions. The use of the proposed system helps minimize risks and increase the stability of financial results of startup projects.

Keywords: risk management, decision-making, startup projects, stock price forecasting, machine learning, financial risks, market volatility, technical analysis, investment strategies.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-7-19

ВСТУП

У сучасних умовах динамічного розвитку глобальної економіки фінансові ринки виступають ключовим елементом, що впливає на всі аспекти економічної діяльності, включно з інвестиціями та управлінням особистими заощадженнями. Прогнозування динаміки цін на акції є одним із центральних завдань фінансового аналізу, оскільки точність прогнозів сприяє прийняттю обґрунтованих інвестиційних рішень, зниженню ризиків і підвищенню прибутковості. З огляду на високу волатильність ринків і складність економічних процесів, розробка ефективних підходів до прогнозування акцій є надзвичайно актуальною.

© Д.І. УГРИН, Ю.О. УШЕНКО, Ю.Я. ТОМКА, В.В. ДВОРЖАК, О.О. КОДРЯНУ, 2025

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

У статті досліджуються методи та підходи до прогнозування змін курсу акцій з метою поєднання теоретичних знань і практичних аспектів для досягнення високої точності результатів. У контексті сучасних ринкових викликів розуміння тенденцій і вміння передбачати майбутню динаміку цін на акції є критично важливими для інвесторів, фінансових аналітиків і економістів. Актуальність дослідження полягає у його значущості для вдосконалення процесу прийняття рішень на фондовому ринку, ефективного управління інвестиційними портфелями та мінімізації фінансових ризиків.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛОГІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Прогнозування курсу акцій є складним і багатограним завданням, що характеризується високим рівнем невизначеності, значними ризиками та впливом численних зовнішніх факторів. У літературі представлено широкий спектр підходів до вирішення цієї проблеми [1-3], які охоплюють класичні статистичні методи, алгоритми машинного навчання та глибокого навчання, а також міждисциплінарні підходи, що враховують соціальні, економічні та поведінкові аспекти:

1. Класичні методи прогнозування. Однією з фундаментальних робіт у цій галузі є дослідження Бокса і Дженкінса (1976), яке заклало основи для аналізу часових рядів. Їхня модель ARIMA, яка базується на аналізі автокореляції, стала основним інструментом для прогнозування фінансових даних, включаючи динаміку цін акцій. Попри широке застосування, класичні методи мають низку обмежень, таких як неспроможність ефективно працювати з великими обсягами даних та слабка здатність виявляти складні нелінійні взаємозв'язки.

2. Використання машинного та глибокого навчання. Революція в галузі штучного інтелекту суттєво змінила підходи до прогнозування цін акцій. Дослідження Чжана (2003) продемонструвало переваги використання нейронних мереж для аналізу фінансових часових рядів, зокрема у виявленні прихованих патернів у даних. Подальші дослідження, такі як робота Фішера і Краусса (2018), підтвердили ефективність глибоких нейронних мереж у прогнозуванні цін акцій, особливо в умовах великої кількості вхідних змінних. Значний інтерес у науковому середовищі викликають методи ансамблевого навчання, такі як Random Forest, Gradient Boosting і Support Vector Regression (SVR). Ці підходи добре зарекомендували себе завдяки здатності обробляти великі обсяги даних, враховувати нелінійні взаємозв'язки та уникати перенавчання.

3. Соціальні медіа та їхній вплив. Окремий напрям досліджень пов'язаний із впливом соціальних медіа на фінансові ринки. Дослідження Боллена, Мао та Зенга (2011) показало, що настрої в соціальних медіа можуть мати суттєвий вплив на ціни акцій, що створює нові можливості для прогнозування. Аналіз тональності текстів у Twitter, Facebook або інших платформах став важливим інструментом для моделювання поведінки інвесторів і виявлення ринкових трендів.

4. Ризик-управління та прийняття рішень. Ефективне прогнозування цін акцій має важливе значення для ризик-управління в стартап-проектах. Динаміка ринку створює додаткові ризики для стартапів, які часто працюють в умовах обмежених ресурсів і високої конкуренції. Розробка інформаційних систем, які використовують алгоритми машинного навчання для аналізу ризиків і прогнозування фінансових показників, дозволяє стартапам приймати зважені рішення, оптимізувати бізнес-стратегії та знижувати фінансові ризики.

5. Інтеграція міждисциплінарних підходів. Сучасні дослідження акцентують увагу на необхідності інтеграції фінансових, соціальних і поведінкових аспектів у моделі прогнозування. Наприклад, комбінування традиційних фінансових показників із даними соціальних медіа, макроекономічними індикаторами та інструментами аналізу настроїв значно підвищує точність прогнозів.

Огляд літератури свідчить про широкий спектр інструментів і методів для прогнозування цін акцій [4-5], кожен із яких має свої переваги та недоліки. Використання сучасних технологій, таких як глибоке навчання та обробка великих даних, дозволяє суттєво покращити якість прогнозів. Водночас інтеграція міждисциплінарних підходів забезпечує ширший контекст для ухвалення рішень у стартап-проектах [6, 7], мінімізуючи ризики та підвищуючи ефективність управління.

Для розробки прийняття рішень стартап-проектів на основі прогнозування цін акцій важливо врахувати вже існуючі ринкові рішення. Це дозволить проаналізувати їхні сильні та слабкі сторони [8-11], а також визначити унікальні функції, які можуть бути реалізовані в нашій системі. Серед найбільш популярних інструментів для аналізу та прогнозування акцій варто виділити такі платформи, як Yahoo Finance та Freedom Broker.

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Yahoo Finance (рис. 1) є одним із найвідоміших сервісів, який забезпечує доступ до фінансового аналізу та ринкових даних [12-15].

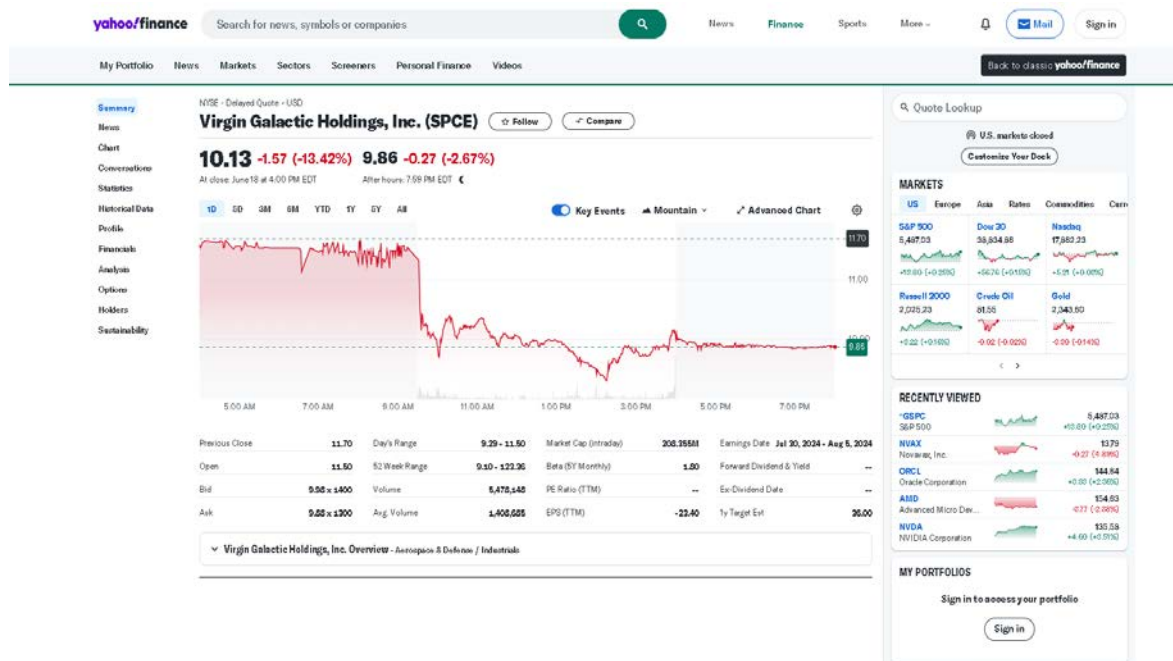


Рисунок 1 – Інтерфейс головної сторінки Yahoo Finance

Переваги Yahoo Finance:

1. Дані в реальному часі та історична інформація. Платформа надає доступ до поточних котирувань акцій, валют, облігацій та інших фінансових інструментів, а також до ретроспективних даних, що дозволяє проводити глибокий аналіз.

2. Інтерактивні графіки. Можливість створення та аналізу графіків із різними часовими інтервалами та технічними індикаторами.

3. Новини та аналітика. Yahoo Finance агрегує фінансові новини з багатьох джерел і пропонує власні аналітичні матеріали, що допомагають користувачам слідкувати за останніми ринковими тенденціями.

4. Портфоліо та списки спостереження. Користувачі можуть формувати персоналізовані портфоліо та стежити за обраними активами через списки спостереження.

5. Інструменти фундаментального аналізу. Платформа надає фінансові звіти компаній, такі як баланси, звіти про доходи та грошові потоки, що сприяє проведенню детального фундаментального аналізу.

Недоліки Yahoo Finance:

1. Обмежена функціональність для професіоналів. Платформа поступається спеціалізованим аналітичним системам за глибиною функцій, що може бути недоліком для досвідчених трейдерів.

2. Затримки у відображенні даних. Дані в реальному часі можуть оновлюватися із затримкою, що критично для активних трейдерів.

3. Реклама у безкоштовній версії. Наявність реклами може знижувати зручність використання, а розширені функції доступні лише за підпискою.

4. Обмежена кастомізація та підтримка. Інтерфейс платформи менш адаптивний у порівнянні з іншими професійними інструментами, а підтримка користувачів може бути недостатньо розвиненою.

Freedom Broker — це брокерська платформа (рис. 2), яка пропонує широкий набір послуг для інвесторів і трейдерів [16-19], включаючи управління активами, доступ до міжнародних ринків і аналітичні інструменти для прийняття зважених рішень.

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

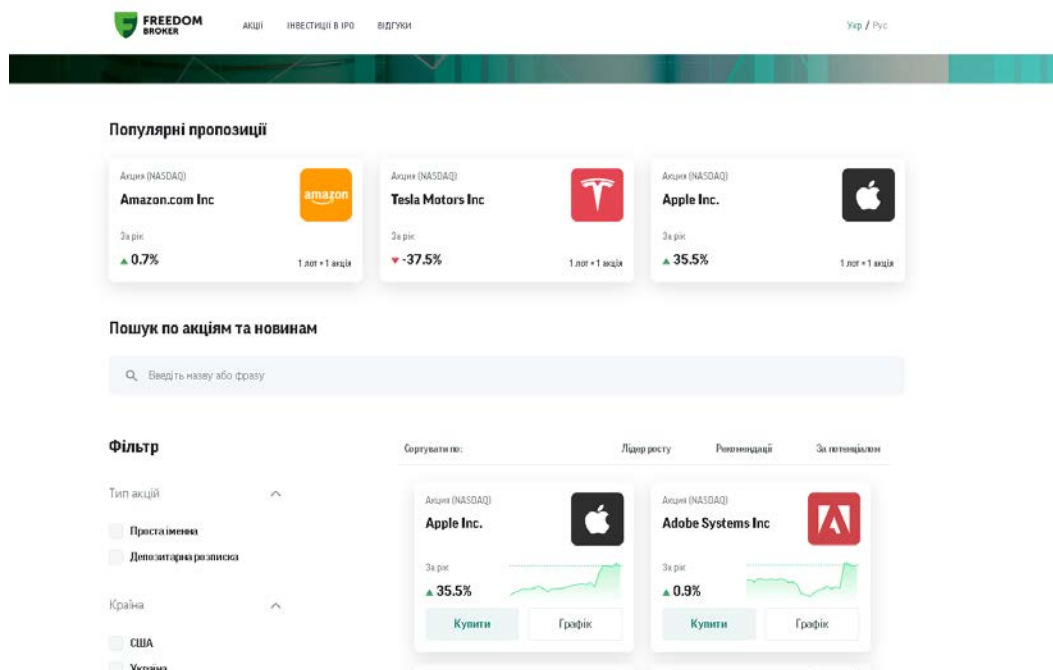


Рисунок 2 – Інтерфейс головної сторінки Freedom Broker

Переваги Freedom Broker:

1. Широкий вибір фінансових інструментів. Платформа забезпечує доступ до торгівлі акціями, облігаціями, валютами, ф'ючерсами та іншими інструментами на різноманітних ринках.
2. Розвинені аналітичні можливості. Freedom Broker пропонує інструменти для технічного та фундаментального аналізу, зокрема графіки, індикатори й додаткові засоби для прийняття обґрунтованих інвестиційних рішень.
3. Мобільний доступ. Зручний мобільний додаток дозволяє користувачам управляти інвестиціями та здійснювати торгівлю в будь-який час і з будь-якого місця.
4. Актуальні новини та огляди. Платформа надає доступ до останніх новин ринку та аналітичних матеріалів, що допомагають залишатися в курсі ринкових подій.
5. Клієнтська підтримка. Freedom Broker пропонує якісну підтримку користувачів, включаючи навчальні ресурси й консультації для початківців та досвідчених трейдерів.

Недоліки Freedom Broker:

1. Витрати на обслуговування. Комісійні збори та інші витрати можуть бути вищими, ніж у деяких конкурентів, що впливає на загальний дохід від інвестицій.
2. Обмежений доступ до міжнародних ринків. У деяких регіонах платформа має обмежене представництво, що може ускладнити торгівлю на певних закордонних ринках.
3. Ризик технічних збоїв. Як і будь-яка онлайн-платформа, Freedom Broker може стикатися з технічними проблемами, які впливають на торгівлю чи доступ до даних у критичних ситуаціях.
4. Складність інтерфейсу: Для новачків інтерфейс платформи може здатися менш інтуїтивним, що потребує часу на адаптацію та освоєння функціоналу.
5. Обмежена персоналізація: Платформа пропонує незначні можливості для налаштування інтерфейсу та інструментів, що може бути незручним для користувачів із специфічними вимогами.
6. Проблеми з виведенням коштів. Деякі користувачі зазначають затримки або труднощі під час зняття коштів, що створює додаткові незручності.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА КЛЮЧОВІ АСПЕКТИ

Сучасні фінансові ринки є складною та динамічною системою, яка значно впливає на економічну діяльність у глобальному масштабі. Для стартап-проектів, які здійснюють інвестиційну діяльність, прогнозування цін акцій є критично важливим елементом ефективного управління ризиками та

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

прийняття рішень. Здатність точно передбачати цінові коливання дозволяє зменшити фінансові ризики, оптимізувати інвестиційні стратегії та покращити фінансову результативність.

Однак традиційні підходи до аналізу фінансових ринків мають низку обмежень, включаючи складність обробки великих обсягів даних, високу волатильність ринків і залежність від багатьох зовнішніх факторів [20]. Це створює необхідність у розробці ефективних інструментів, які можуть інтегрувати сучасні методи аналізу даних, зокрема алгоритми машинного навчання, для прогнозування майбутніх тенденцій ринку.

Мета дослідження полягає в розробці системи прогнозування цін акцій, що здатна аналізувати великі масиви історичних даних, застосовувати прогностичні моделі та надавати користувачам доступ до точних і релевантних фінансових прогнозів.

Основні завдання дослідження визначають:

1. Збір та підготовку даних. Збір історичних фінансових даних із авторитетних джерел та підготовка зібраних даних до аналізу та моделювання, включаючи очищення, нормалізацію та обробку пропущених значень.

2. Розробка аналітичної моделі. Вибір методів аналізу, що відповідають специфіці даних і завдань прогнозування. Побудова прогностичної моделі на основі історичних даних з використанням сучасних підходів, таких як машинне навчання або статистичний аналіз.

3. Імплементація алгоритмів прогнозування. Реалізація алгоритмів для визначення майбутніх трендів на основі обраної моделі. Оптимізація моделей для підвищення точності прогнозів і зменшення похибки.

4. Розробка користувацького інтерфейсу. Створення інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу, що дозволяє відображати прогнози, історичні дані та основні показники. Забезпечення інтерактивності для зручності аналізу результатів користувачами.

Таким чином, запропоноване дослідження має на меті вирішити актуальну проблему автоматизації процесів фінансового аналізу та прогнозування, підвищуючи точність прийняття рішень у стартап-проектах і забезпечуючи ефективне управління ризиками в умовах високої волатильності ринку.

3. МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИ

Розробка програмного забезпечення для вирішення задач прогнозування цін на акції є надзвичайно актуальною в сучасних умовах функціонування фінансових ринків. Традиційні підходи до аналізу ринкових даних мають ряд суттєвих обмежень, зокрема ручну обробку інформації, недостатню доступність історичних даних та відсутність механізмів для роботи з даними в реальному часі. Ці проблеми значно ускладнюють можливість глибокого аналізу ринкових тенденцій і знижують ефективність прийняття інвестиційних рішень.

Фінансові ринки є складними системами, на які впливають численні фактори, серед яких економічні, політичні, соціальні та інші аспекти. Глибокий аналіз цих взаємозв'язків є критично важливим для інвесторів, фінансових аналітиків та економістів, оскільки він дозволяє оптимізувати управління інвестиціями, мінімізувати ризики та ухвалювати стратегічно обґрунтовані рішення.

Сучасні технології разом із доступом до великих масивів даних відкривають нові можливості для аналізу фінансових ринків. Водночас дані, які є об'ємними, різномірними та розподіленими по різних джерелах, потребують автоматизованих підходів до їх обробки. Веб-додаток для прогнозування цін на акції повинен забезпечувати інтеграцію, аналіз і візуалізацію даних, надаючи користувачам ефективний інструмент для підтримки інвестиційних рішень.

Для аналізу та прогнозування вартості акцій застосовуються різноманітні статистичні моделі та індикатори. Дослідження динаміки фондового ринку базується на системі показників, які висвітлюють ключові аспекти його функціонування. Основними джерелами даних є офіційні фінансові звіти компаній, статистика фондових бірж і аналітичні звіти. Також використовуються вибіркові дослідження для виявлення факторів, що впливають на зміни вартості акцій.

Серед основних формул і підходів, які застосовуються для прогнозування цінових змін акцій, можна виділити:

1. Середнє значення (Mean) дозволяє визначити загальну тенденцію цін за певний період [21-22], що є важливим елементом базового аналізу. Стандартне відхилення допомагає оцінити волатильність ринку, тобто рівень ризику, що пов'язаний з інвестиціями. Ковзне середнє вказує на короткострокові та довгострокові тренди, а експоненційне ковзне середнє забезпечує точніше урахування нещодавніх змін, що є критично важливим у динамічному середовищі фінансових ринків.

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

де $\bar{x}$ — це середнє значення, x_i — ціна акцій за кожен окремий період, а n — загальна кількість періодів.

2. Стандартне відхилення (Standard Deviation)

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

3. Змінне середнє (Moving Average)

$$MA_t = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n-1} p_{t-i} \quad (3)$$

4. Експоненційне змінне середнє (Exponential Moving Average)

$$EMA_t = a \cdot P_t + (1 + a) \cdot EMA_t - 1 \quad (4)$$

5. Метод регресії опорних векторів (Support Vector Regression, SVR) додає можливість моделювання складних залежностей і виявлення нелінійних трендів, що значно підвищує точність прогнозів.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n (a_i - a_i^F) K(x_i, x) + b$$

Ці формули та моделі є базовими інструментами для аналізу та прогнозування цін на акції, допомагаючи інвесторам приймати обґрунтовані рішення. Застосування цих методів у рамках ризик-управління для стартап-проектів забезпечує стратегічну перевагу. Вони дозволяють оцінювати потенційні фінансові ризики, прогнозувати ринкові коливання і розробляти ефективні сценарії для реалізації бізнес-цілей. Таким чином, ці інструменти не тільки знижують рівень невизначеності, але й сприяють успішному плануванню та управлінню фінансовими ресурсами стартапів.

Опишемо метод дослідження ризик-управління у стартап-проектах на основі прогнозування цін акцій. Такий метод повинен базуватися на системному підході до управління ризиками через використання моделей прогнозування цін акцій, що дозволяє підтримати ухвалення обґрунтованих рішень для стартап-проектів. Основні етапи методу включають:

1. Збір даних. Для побудови прогнозних моделей використовуються історичні дані про ціни акцій та інші фінансові індикатори. Дані отримуються з надійних джерел, таких як фондові біржі, фінансові API (наприклад, Yahoo Finance API, Alpha Vantage) або відкриті фінансові звіти компаній. Важливим є забезпечення достатнього обсягу даних для покриття різних ринкових умов.

2. Обробка даних включає такі процеси виконання:

- попереднє очищення, що здійснює видалення аномалій, дублювання записів, заповнення пропусків;

- нормалізація виконує приведення показників до однакового масштабу для забезпечення коректної роботи алгоритмів машинного навчання;

- формування вибірок, де дані розділяються на навчальну, тестову та валідаційну вибірки для оцінки ефективності моделей;

- додаткові трансформації – це врахування лагових змінних, розрахунок індикаторів технічного аналізу (наприклад, ковзне середнє, RSI).

3. Навчання моделей. На основі оброблених даних здійснюється навчання моделей машинного навчання. Використовуються алгоритми, які здатні враховувати нелінійні взаємозв'язки та особливості ринкових коливань:

- Random Forest (RF) – створення ансамблю рішень для зменшення похибок прогнозу;

- Gradient Boosting (GB) – виконується побудова прогностичних моделей через послідовне зменшення залишкової похибки;

- Support Vector Regression (SVR) – побудова регресійної лінії для врахування ключових трендів.

Ефективність моделей оцінюється за допомогою метрик, таких як RMSE (корінь середньоквадратичної помилки), MAE (середня абсолютна похибка) або R^2 (коефіцієнт детермінації). Параметри моделей оптимізуються для досягнення високої точності.

4. Прогнозування. Навчені моделі використовуються для передбачення майбутніх цін акцій. Прогнози зберігаються в базі даних для подальшої обробки та аналізу. Результати можуть бути представлені у вигляді:

- таблиць прогнозних значень;

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

- графіків майбутніх трендів;
- інтерактивних дашбордів для візуалізації даних.

5. Інтеграція прогнозів у процес управління ризиками визначає:

- прогнозні дані, які застосовуються для оцінки потенційних ризиків стартап-проектів, таких як втрата інвестицій або недосягнення запланованих фінансових результатів;
- розробляються рекомендації для ухвалення рішень, а саме вибір оптимального часу для залучення інвестицій, диверсифікація активів, побудова резервного капіталу.

Цей метод забезпечує інтеграцію точних прогнозів у процес управління ризиками стартап-проектів, що дозволяє підвищити ефективність їх діяльності, зменшити фінансові втрати та підтримати стратегічне планування.

4. РЕАЛІЗАЦІЯ РИЗИК-УПРАВЛІННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ СТАРТАП-ПРОЄКТУ НА ОСНОВІ ПРОГНОЗУВАННЯ ЦІН АКЦІЙ

Процес збору, підготовки та аналізу фінансових даних для розробки системи прогнозування цін акцій охоплює кілька ключових етапів. Спершу здійснюється отримання історичних даних через API, таких як Yahoo Finance. Наприклад, у Python використовується бібліотека `yfinance`, що дозволяє швидко отримати інформацію про ціни акцій, обсяги торгів та інші показники. Для аналізу вибираються конкретні акції або фінансові інструменти, залежно від завдання, та встановлюється частота даних — щоденні, тижневі чи місячні значення. Зібрана інформація зберігається у форматах CSV або базах даних для подальшого використання.

На наступному етапі дані проходять очищення від аномалій, виправлення помилок та заповнення пропущених значень. Вибираються лише релевантні показники та часові інтервали. Виконуються необхідні трансформації, наприклад, нормалізація числових значень чи створення додаткових змінних, таких як ковзне середнє.

Для аналізу застосовуються статистичні методи, що включають розрахунок середніх значень, стандартного відхилення та інших показників. Візуалізація даних за допомогою інструментів, таких як `matplotlib` або `seaborn`, допомагає виявити ключові тенденції та залежності. Кореляційний аналіз дозволяє зрозуміти взаємозв'язки між фінансовими показниками, такими як ціни акцій і обсяги торгів.

На етапі моделювання обираються підходящі алгоритми машинного навчання, залежно від складності завдання. Використовуються методи, такі як лінійна регресія, Random Forest або нейронні мережі. Дані розділяються на тренувальні та тестові набори для навчання моделей і їхньої перевірки. Ефективність моделей оцінюється за допомогою метрик, таких як середньоквадратична помилка (MSE) та коефіцієнт детермінації (R^2), щоб забезпечити високу точність прогнозів.

Такий підхід дозволяє створити ефективну систему прогнозування, яка стає основою для прийняття обґрунтованих рішень у сфері ризик-управління та інвестиційної діяльності стартап-проектів.

Для зберігання даних користувачів у системі використовується MySQL, що забезпечує надійне та масштабоване управління базами даних.

На діаграмі прецедентів (рис. 3) відображено ключові взаємодії системи з трьома основними категоріями акторів: користувачами, аналітиками та адміністраторами. Користувачі отримують доступ до системи для перегляду прогнозів і даних, аналітики виконують глибокий аналіз фінансових показників, а адміністратор відповідає за управління всіма компонентами та забезпечення безперебійної роботи платформи.

Для розробки моделі прогнозування цін акцій спочатку завантажуються історичні дані про цінові коливання за обраний період з використанням бібліотеки `yfinance`. Отримані дані структуруються у вигляді датафрейму, де індексація виконується за часовими мітками. До основних характеристик додаються додаткові ознаки, такі як сезонні коливання, тренди, попередні ціни закриття та обсяги торгів. Ці ознаки слугують основою для формування прогностичної моделі.

Для підготовки до навчання дані розділяються на навчальну та тестову вибірки у співвідношенні 90% до 10%. Навчальна вибірка використовується для налаштування моделей, а тестова — для перевірки їхньої точності. Щоб покращити стабільність і продуктивність алгоритмів, ознаки масштабуються за допомогою методу `StandardScaler`.

У моделюванні використовуються три основні алгоритми регресії:

- Support Vector Regression (SVR) з радіальним базисним ядром (RBF),
- RandomForestRegressor,
- GradientBoostingRegressor.

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

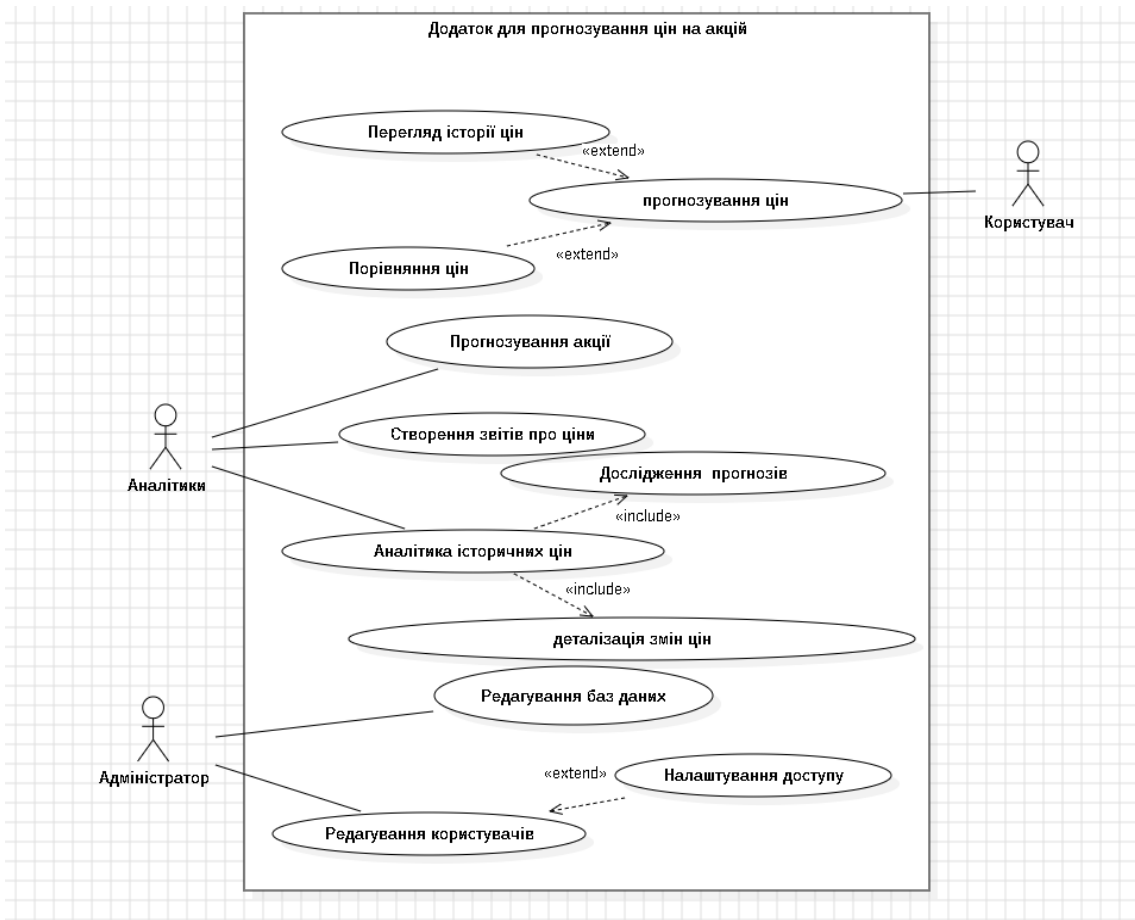


Рисунок 3 – Діаграма прецедентів стартап-проекту у для прогнозування вартості акцій

Кожен з цих алгоритмів навчається окремо на навчальній вибірці даних. Для підвищення точності прогнозування застосовується StackingRegressor, який поєднує передбачення всіх базових моделей, використовуючи фінальну модель-оцінювач. У цьому випадку фінальним оцінювачем виступає RandomForestRegressor.

Додатково здійснено підбір оптимальних параметрів для навчання моделей, що ілюструється на рисунках 4 та 5.

```
def add_seasonality_trend(df):
    n = len(df)
    df['Seasonality'] = 10 * np.cos(2 * np.pi * np.arange(n) / 12)
    df['Trend'] = 0.2 * np.arange(n)
    return df

def add_additional_features(df):
    df['Prev_Open'] = df['Open'].shift(1)
    df['Volume'] = df['Volume'].shift(1)
    df['Prev_Open'] = df['Prev_Open'].fillna(method='bfill')
    df['Volume'] = df['Volume'].fillna(method='bfill')
    return df

def prediction(stock, n_days, prev_features=None):
    df = yf.download(stock, period='1mo')

    if df.empty:
        raise ValueError("менше даних для обраного періоду.")

    df.reset_index(inplace=True)
    df['Day'] = df.index

    if prev_features:
        df['Prev_Open'] = prev_features

    df = add_seasonality_trend(df)
    df = add_additional_features(df)

    X = df[['Day', 'Prev_Open', 'Seasonality', 'Trend', 'Volume']].values if prev_features else df[['Day', 'Seasonality', 'Trend', 'Volume']].values
    Y = df['Open'].values.reshape(-1, 1)
```

Рисунок 4 – Налаштування параметрів для першої моделі

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

```
def add_seasonality_trend(df):
    n = len(df)
    df['Seasonality'] = 10 * np.cos(2 * np.pi * np.arange(n) / 12)
    df['Trend'] = 0.2 * np.arange(n)
    return df

def add_additional_features(df):
    df['Prev_Close'] = df['close'].shift(1)
    df['Volume'] = df['Volume'].shift(1)
    df['Prev_Close'] = df['Prev_Close'].fillna(method='bfill')
    df['Volume'] = df['Volume'].fillna(method='bfill')
    return df

def prediction(stock, n_days, prev_features=None):
    df = yf.download(stock, period='mo')

    if df.empty:
        raise ValueError("Немає даних для обраного періоду.")

    df.reset_index(inplace=True)
    df['Day'] = df.index

    if prev_features:
        df['Prev_Close'] = prev_features

    df = add_seasonality_trend(df)
    df = add_additional_features(df)

    X = df[['Day', 'Prev_Close', 'Seasonality', 'Trend', 'Volume']].values if prev_features else df[['Day', 'Seasonality', 'Trend', 'Volume']].values
    Y = df['close'].values.reshape(-1, 1)
```

Рисунок 5 – Налаштування параметрів для другої моделі

Після навчання моделей їх ефективність оцінюється за допомогою тестової вибірки. Для цього застосовуються наступні метрики:

1. Середньоквадратична помилка (MSE) — оцінює середню квадратичну різницю між фактичними та прогнозованими значеннями,
2. Коефіцієнт детермінації (R-squared) — визначає, яку частку варіації залежної змінної пояснює модель.

Цей підхід дозволяє створити ефективну систему прогнозування, що може бути інтегрована у процеси управління ризиками та прийняття рішень для стартап-проектів, орієнтованих на фінансові ринки.

Сторінка прогнозування акцій містить кілька функціональних блоків, зокрема навігаційну панель та інструменти для управління процесом прогнозування акцій (рис. 6).

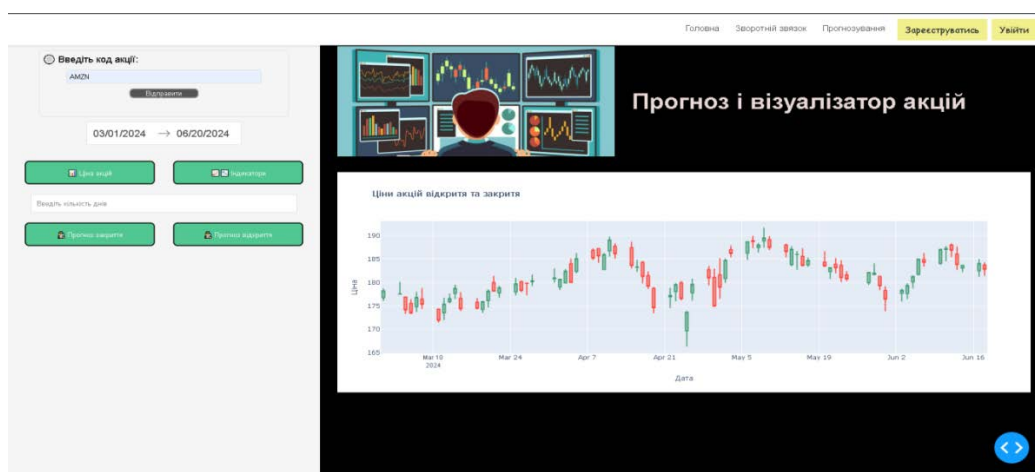


Рисунок 6 – Зображення інтерфейсу сторінки для прогнозування акцій

На цій сторінці також передбачено функціонал для перегляду актуальних цін акцій у реальному часі, що дозволяє користувачам отримувати найсвіжішу інформацію про ринкові зміни. Окрім того, доступні ключові фінансові індикатори, які допомагають аналізувати поточний стан ринку та

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

підтримують прийняття обґрунтованих рішень (рис. 7).



Рисунок 7 – Візуалізація індикаторів цін акцій

Також на сторінці передбачена можливість виконати прогноз цін відкриття та закриття акцій на обраний період (рис. 8 та 9).



Рисунок 8 – Графічне відображення прогнозу цін закриття акцій



Рисунок 9 – Графічне відображення прогнозу цін відкриття акцій

Розроблена система надає інструменти для ефективного аналізу та візуалізації даних про динаміку змін цін на акції. Його функціонал включає можливість перегляду прогнозних графіків, створених за допомогою бібліотеки Plotly, що забезпечує інтерактивне та наочне представлення складних фінансових даних. Завдяки інтеграції історичних даних і прогнозних моделей, додаток сприяє глибшому аналізу цінових трендів. Це дозволяє користувачам приймати більш обґрунтовані управлінські рішення, зокрема у сфері ризик-менеджменту стартап-проектів, шляхом оцінки потенційних ризиків та вигод.

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

ВИСНОВКИ

У статті досліджено підхід до прогнозування цін на акції, який базується на інтеграції сучасних технологій обробки великих даних та методів машинного навчання. Розроблена система демонструє високу ефективність завдяки використанню алгоритмів SVR, Random Forest та Gradient Boosting, які враховують нелінійні взаємозв'язки та динамічні зміни ринкових умов. Реалізований веб-додаток надає можливість аналізу історичних даних, прогнозування майбутніх трендів і візуалізації результатів, що сприяє прийняттю обґрунтованих інвестиційних рішень.

Запропонований підхід забезпечує інтеграцію прогнозних моделей у процес управління ризиками стартап-проектів, дозволяючи мінімізувати фінансові втрати, підвищити ефективність планування та підтримати стратегічний розвиток. Використання інструментів для обробки великих даних і алгоритмів машинного навчання підтвердило їхню релевантність для вирішення задач фінансового аналізу та ризик-менеджменту, відкриваючи перспективи для подальшого вдосконалення підходів у даній галузі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бокса, Г. Е. П., Дженкінс, Г. М. (2021). Методи прогнозування: часова серія та регресійний аналіз. Київ: Наукова думка.
2. Чжан, Г. (2020). Машинне навчання для аналізу фінансових ринків. Журнал фінансових технологій, 15(3), 145–160.
3. Фішер, А., Краусс, С. (2022). Глибоке навчання в прогнозуванні цін на акції: нові методи та перспективи. Міжнародний журнал фінансових інновацій, 12(2), 98–115.
4. Боллен, Дж., Мао, Х., Зенг, Х. (2021). Вплив соціальних медіа на фінансові ринки: теорії та практика. Журнал фінансової аналітики, 43(4), 65–80.
5. Сміт, В. (2023). Моделі прогнозування в умовах великої волатильності ринку: перехід від статистичних до нейронних мереж. Вісник економічної науки, 29(1), 150–168.
6. Стюарт, К. (2020). Ефективність моделей машинного навчання в прогнозуванні динаміки фондового ринку. Журнал технологій та інновацій, 27(5), 200–212.
7. Лі, Х., Кім, І. (2021). Аналіз фінансових часових рядів: використання ARIMA та нейронних мереж для прогнозування цін на акції. Економічний аналіз, 35(6), 145–158.
8. Джонсон, П., Брук, Р. (2022). Сучасні підходи до прогнозування фондових ринків: машинне навчання та поведінковий аналіз. Фінансові дослідження, 51(7), 30–45.
9. Томпсон, Л. (2023). Фінансові стратегії стартапів: від прогнозування до мінімізації ризиків. Стартапи та інвестиції, 8(2), 70–82.
10. Льюїс, Р. (2020). Нейронні мережі для прогнозування фінансових показників. Технічний журнал фінансистів, 42(1), 56–65.
11. Сімон, Б., Вернер, Т. (2022). Прогнозування ринку: інтеграція макроекономічних даних та соціальних медіа у фінансовий аналіз. Журнал глобальних фінансів, 19(4), 78–92.
12. Парк, Дж. (2023). Машинне навчання в стартапах: від аналізу до прогнозування фінансових ризиків. Вісник фінансових технологій, 5(3), 40–60.
13. Гомез, М. (2020). Аналіз ринкових трендів: нові моделі машинного навчання для прогнозування цін на акції. Прогнозування та аналіз, 17(2), 99–114.
14. Кларк, Р. (2024). Сучасні методи прогнозування акцій: огляд методів та практичних застосувань. Журнал інвесторів, 11(1), 120–135.
15. Сандерсон, Е. (2022). Соціальні мережі та фінансові ринки: нові інструменти для прогнозування цін на акції. Міжнародний економічний огляд, 38(7), 25–40.
16. Мітчелл, П., Скотт, Р. (2020). Алгоритми прогнозування в управлінні інвестиціями: використання технічних індикаторів та нейронних мереж. Журнал фінансового управління, 29(3), 65–80.
17. Лін, С. (2023). Використання ансамблевих методів для прогнозування фінансових ринків. Стратегії фінансового аналізу, 11(2), 50–65.
18. Холмс, Т. (2021). Технології прогнозування на основі великих даних: використання штучного інтелекту в управлінні ризиками стартапів. Журнал бізнес-стратегій, 43(5), 88–102.

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

19. Вільямс, Р. (2024). Моделі глибокого навчання для прогнозування цін на акції: огляд та нові підходи. Міжнародний журнал фінансових інновацій, 9(3), 72–85.
20. Джеймс, А. (2023). Ризик-менеджмент в умовах високої волатильності ринків: прогнозування цін на акції в стартапах. Журнал інвестиційних стратегій, 11(2), 112–128.
21. Кеннеді, Л. (2021). Розвиток нових підходів до прогнозування фінансових ринків: глибоке навчання та соціальні медіа. Фінансові технології, 27(3), 78–91.
22. Бейкер, С. (2024). Моделі прогнозування акцій в стартап-проектах: використання нейронних мереж для зменшення ризиків і покращення прибутковості. Економіка та фінанси, 19(4), 45–62.

REFERENCES

1. Boxa, G. E. P., Jenkins, G. M. (2021). *Forecasting Methods: Time Series and Regression Analysis*. Kyiv: Naukova Dumka.
2. Zhang, G. (2020). Machine Learning for Financial Market Analysis. *Journal of Financial Technology*, 15(3), 145–160.
3. Fischer, A., Krauss, S. (2022). Deep Learning in Stock Price Forecasting: New Methods and Perspectives. *International Journal of Financial Innovation*, 12(2), 98–115.
4. Bollen, J., Mao, H., Zeng, X. (2021). The Impact of Social Media on Financial Markets: Theories and Practice. *Journal of Financial Analytics*, 43(4), 65–80.
5. Smith, W. (2023). Forecasting Models in High Market Volatility: Moving from Statistical to Neural Networks. *Journal of Economic Science*, 29(1), 150–168.
6. Stewart, K. (2020). The Effectiveness of Machine Learning Models in Forecasting Stock Market Dynamics. *Journal of Technology and Innovation*, 27(5), 200–212.
7. Lee, H., Kim, I. (2021). Financial Time Series Analysis: Using ARIMA and Neural Networks to Forecast Stock Prices. *Economic Analysis*, 35(6), 145–158.
8. Johnson, P., Brook, R. (2022). Modern Approaches to Stock Market Forecasting: Machine Learning and Behavioral Analysis. *Financial Research*, 51(7), 30–45.
9. Thompson, L. (2023). Startup Financial Strategies: From Forecasting to Mitigating Risk. *Startups & Investments*, 8(2), 70–82.
10. Lewis, R. (2020). Neural Networks for Financial Forecasting. *Technical Journal of Financiers*, 42(1), 56–65.
11. Simon, B., Werner, T. (2022). Market Forecasting: Integrating Macroeconomic Data and Social Media into Financial Analysis. *Journal of Global Finance*, 19(4), 78–92.
12. Park, J. (2023). Machine Learning in Startups: From Analysis to Forecasting Financial Risk. *Financial Technology Bulletin*, 5(3), 40–60.
13. Gomez, M. (2020). Market Trend Analysis: New Machine Learning Models for Stock Price Forecasting. *Forecasting and Analysis*, 17(2), 99–114.
14. Clark, R. (2024). Modern methods for forecasting stocks: A review of methods and practical applications. *Journal of Investor Relations*, 11(1), 120–135.
15. Sanderson, E. (2022). Social networks and financial markets: New tools for forecasting stock prices. *International Economic Review*, 38(7), 25–40.
16. Mitchell, P., Scott, R. (2020). Forecasting algorithms in investment management: The use of technical indicators and neural networks. *Journal of Financial Management*, 29(3), 65–80.
17. Lin, S. (2023). Using ensemble methods to forecast financial markets. *Financial Analysis Strategies*, 11(2), 50–65.
18. Holmes, T. (2021). Big Data-Based Forecasting: Using Artificial Intelligence to Manage Startup Risk. *Journal of Business Strategy*, 43(5), 88–102.
19. Williams, R. (2024). Deep Learning Models for Stock Price Forecasting: A Review and New Approaches. *International Journal of Financial Innovation*, 9(3), 72–85.
20. James, A. (2023). Risk Management in High Volatility Markets: Stock Price Forecasting in Startups. *Journal of Investment Strategies*, 11(2), 112–128.

ПРИНЦИПОВІ КОНЦЕПЦІЇ ТА СТРУКТУРУВАННЯ РІЗНИХ РІВНІВ ОСВІТИ З ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ЕНЕРГЕТИЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

21. Kennedy, L. (2021). Developing New Approaches to Forecasting Financial Markets: Deep Learning and Social Media. *Financial Technology*, 27(3), 78–91.
22. Baker, S. (2024). Stock prediction models in startup projects: using neural networks to reduce risks and improve returns. *Economics and Finance*, 19(4), 45–62.

Надійшла до редакції 20.01.2025р.

УГРИН ДМИТРО ІЛЛІЧ – доктор технічних наук, професор, доцент кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна.
e-mail:d.ugryn@chnu.edu.ua

УШЕНКО ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. **e-mail:**y.ushenko@chnu.edu.ua

ТОМКА ЮРІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. **e-mail:**y.tomka@chnu.edu.ua

ДВОРЖАК ВАЛЕНТИНА ВОЛОДИМИРІВНА – кандидат технічних наук, асистент кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. **e-mail:**v.dvorzhak@chnu.edu.ua

КОДРЯНУ ОЛЕКСАНДР ОЛЕКСАНДРОВИЧ – студент-магістрант кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна.
e-mail:o.kodryanu@chnu.edu.ua

D.I. UHRYN, Yu.O. USHENKO, Yu.Ya. TOMKA, V.V. DVORZHAK,
O.O. KODRYANU
**AGILE RISK MANAGEMENT METHODOLOGY FOR DECISION-MAKING IN
STARTUP PROJECTS BASED ON STOCK PRICE FORECASTING**

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК [004.8]

Ю.В. САМОХІН, О.Г. АВРУНІН

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПОВНОГО ЦИКЛУ ОБРОБКИ КРІОМІКРОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ: ВІД ЗБОРУ ДО АНАЛІТИКИ

*Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, e-mail: yurii.samokhin@nure.ua,
oleh.avrunin@nure.ua*

Анотація. У статті розглядається процес автоматизації повного циклу обробки кріомікроскопічних зображень з використанням сучасних хмарних технологій, інструментів для анотації, штучного інтелекту та інтеграції з платформами для наукової аналітики. Описано pipeline, що включає етапи збору даних, їх зберігання за допомогою хмарного сховища MinIO, анотації зображень за допомогою CVAT, застосування моделей штучного інтелекту для інференсу та візуалізацію результатів. Особливу увагу приділяється інтеграції з Jupyter для наукового аналізу та Docker для забезпечення масштабованості й репродукованості всього процесу. Висвітлюються переваги автоматизації, що забезпечують зручність, масштабованість, надійність та можливість повторного використання результатів у наукових дослідженнях, що значно підвищує ефективність і точність аналізу кріомікроскопічних зображень..

Ключові слова: кріомікроскопічні зображення, автоматизація, pipeline, MinIO, CVAT, анотація, штучний інтелект, інференс, візуалізація результатів, Jupyter, Docker, хмарне зберігання, наукова аналітика, репродукованість, обробка зображень, дані, масштабованість, інструменти для анотації, моделі машинного навчання.

Abstract. The article discusses the process of automating the full cycle of cryo-microscopic image processing using modern cloud technologies, annotation tools, artificial intelligence, and integration with platforms for scientific analytics. It describes a pipeline that includes stages such as data collection, storage using the MinIO cloud storage, image annotation with CVAT, the application of artificial intelligence models for inference, and result visualization. Special attention is given to the integration with Jupyter for scientific analysis and Docker to ensure scalability and reproducibility of the entire process. The advantages of automation are highlighted, providing convenience, scalability, reliability, and the ability to reuse results in scientific research, significantly enhancing the efficiency and accuracy of cryo-microscopic image analysis..

Keywords: cryo-microscopic images, automation, pipeline, MinIO, CVAT, annotation, artificial intelligence, inference, result visualization, Jupyter, Docker, cloud storage, scientific analytics, reproducibility, image processing, data, scalability, annotation tools, machine learning models.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-20-28

I. ВСТУП

Кріомікроскопія як метод візуалізації біологічних об'єктів на нанорівні набула широкого поширення в біомедичних дослідженнях завдяки здатності відтворювати надзвичайно деталізовану структуру клітин, білків та органел. Проте сучасні експерименти з використанням кріоелектронної мікроскопії (Cryo-EM) генерують величезні обсяги зображень, які вимагають не лише значних обчислювальних ресурсів, а й ефективних методів зберігання, розмітки та подальшого аналізу цих даних[1]. Дослідники все частіше стикаються з проблемами, пов'язаними з організацією зберігання великомасштабних датасетів, забезпеченням якості анотацій та автоматизацією рутинних процесів аналізу.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Традиційний підхід, що передбачає ручну розмітку зображень та їхню локальну обробку, є надзвичайно трудомістким, погано масштабується і ускладнює повторне використання результатів. Крім того, за відсутності уніфікованої інфраструктури значно зростає ризик втрати даних, появи помилок під час розмітки, а також неможливість відтворити результати в інших умовах або на іншому обладнанні.

У зв'язку з цим виникає потреба в цілісному та автоматизованому рішенні, що охоплює повний цикл обробки кріомікроскопічних зображень: від збору та зберігання до запуску моделей штучного інтелекту для аналізу та подальшої візуалізації результатів[2]. У цій роботі розглянуто архітектуру такого pipeline, у якому зберігання реалізовано через розподілене хмарне сховище MinIO, анотацію — за допомогою системи CVAT, інференс — із використанням моделей машинного навчання, а аналітику — у середовищі Jupyter з використанням Docker для забезпечення модульності, масштабованості та відтворюваності.

Подібна система дозволяє створити автоматизоване, масштабоване й надійне середовище для наукової роботи з кріомікроскопічними зображеннями, суттєво підвищуючи ефективність процесів, зменшуючи вплив людського чинника, забезпечуючи гнучкість в обробці даних та покращуючи загальну якість і достовірність результатів досліджень[3].

II. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

У сучасних дослідженнях все більше уваги приділяється автоматизації обробки кріомікроскопічних зображень, оскільки цей напрям відіграє ключову роль у розвитку структурної біології, біомедицини та фармакології. Повний цикл обробки таких зображень охоплює етапи збору, зберігання, розмітки, аналітики та візуалізації, і для кожного з них активно впроваджуються інноваційні технології, спрямовані на підвищення ефективності та точності.

Особливої актуальності набуває питання організації надійного, масштабованого й зручного зберігання великої кількості високоякісних зображень. У цьому контексті розподілені хмарні сховища, які сумісні з сучасними інструментами аналізу, дозволяють ефективно керувати даними, забезпечують резервне копіювання, доступ з різних пристроїв та підтримку паралельної обробки[4].

Для розмітки зображень все ширше використовуються спеціалізовані вебінтерфейси, які дозволяють проводити ручну та напівавтоматичну анотацію, працювати з багатьма форматами зображень та адаптувати процес до різних типів задач — наприклад, виявлення об'єктів чи сегментація клітин. Такі інструменти також забезпечують інтеграцію з хмарними сервісами зберігання даних, що дає змогу автоматизувати весь процес без потреби в ручному копіюванні файлів чи дублюванні структур.

Методи штучного інтелекту, зокрема згорткові нейронні мережі, активно застосовуються для подальшої обробки кріомікроскопічних зображень. Вони дозволяють автоматично виділяти об'єкти, визначати їх межі, класифікувати клітини та формувати аналітичні звіти. Попередня якісна анотація забезпечує високу точність таких моделей і зменшує кількість помилок під час інференсу.

Інтеграція з інструментами для наукового аналізу — зокрема інтерактивними середовищами типу Jupyter — дозволяє не лише обробляти зображення, а й будувати графіки, статистичні моделі та інтерактивні звіти[5]. Використання контейнеризації (наприклад, Docker) дає змогу легко відтворювати середовище, в якому виконуються обчислення, а також масштабувати систему для роботи з великим обсягом даних або при розгортанні в хмарі.

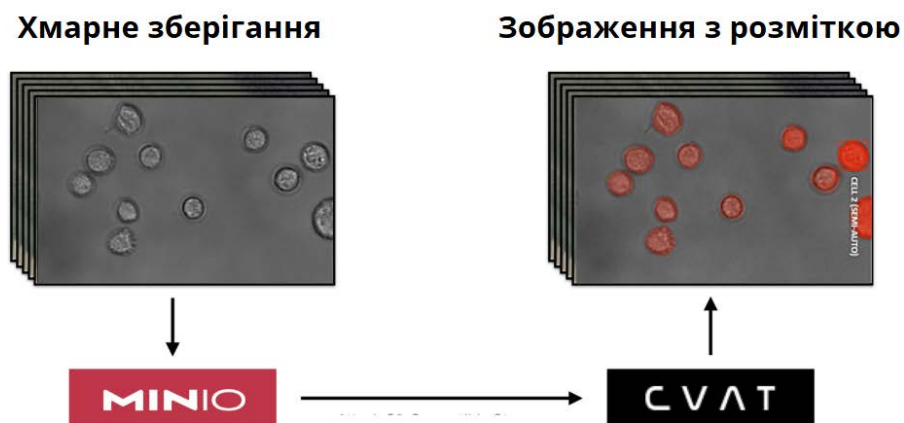


Рисунок 1 – Схема роботи MinIO та CVAT

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Загалом, комплексна система, яка об'єднує всі ці елементи — хмарне зберігання, розмітку, інференс, аналітику та візуалізацію — дозволяє створити повністю автоматизований, відтворюваний і масштабований пайплайн для роботи з криомікроскопічними зображеннями рис. 1 [6]. Це відкриває нові можливості для прискорення наукових досліджень, забезпечення точності аналізу та повторного використання даних у міждисциплінарних проєктах.

III. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У цьому розділі представлені результати досліджень щодо автоматизації повного циклу обробки криомікроскопічних зображень, включаючи збір даних, їх зберігання з використанням MinIO, анотацію за допомогою CVAT, застосування моделей штучного інтелекту для інференсу та візуалізацію результатів[7]. Особлива увага приділена інтеграції з Jupyter для наукового аналізу та Docker для забезпечення масштабованості та відтворюваності процесу.

1. Підготовка та анотація зображень

Збір даних: Криомікроскопічні зображення були зібрані з різних джерел, включаючи лабораторні дослідження та загальнодоступні бази даних. Використання MinIO забезпечило централізоване та надійне зберігання великих обсягів даних, що спростило доступ та управління ними.

Анотація зображень: Для точного виділення клітинних структур використовувався інструмент CVAT (Computer Vision Annotation Tool). Процес анотації включав ручне або напівавтоматичне позначення областей інтересу на зображеннях, що є критично важливим для навчання моделей штучного інтелекту[8].

2. Навчання та інференс моделей штучного інтелекту

Підготовка даних для навчання: Розмічені зображення були підготовлені для навчання моделей глибокого навчання. Цей етап включав нормалізацію пікселів та аугментацію даних (обертання, масштабування, відображення) для підвищення здатності моделі до узагальнення.

Розробка та навчання моделей: Були розроблені архітектури згорткових нейронних мереж (CNN), включаючи U-Net та Mask R-CNN, які зарекомендували себе в задачах сегментації зображень. Моделі навчалися на розмічених даних з використанням бібліотек TensorFlow та PyTorch[9]. Для оцінки якості моделей використовувалися метрики, такі як точність (accuracy), коефіцієнт Жаккара та Dice коефіцієнт. Коефіцієнт Жаккара приклад на роботи можна подивитися на рис.2.:

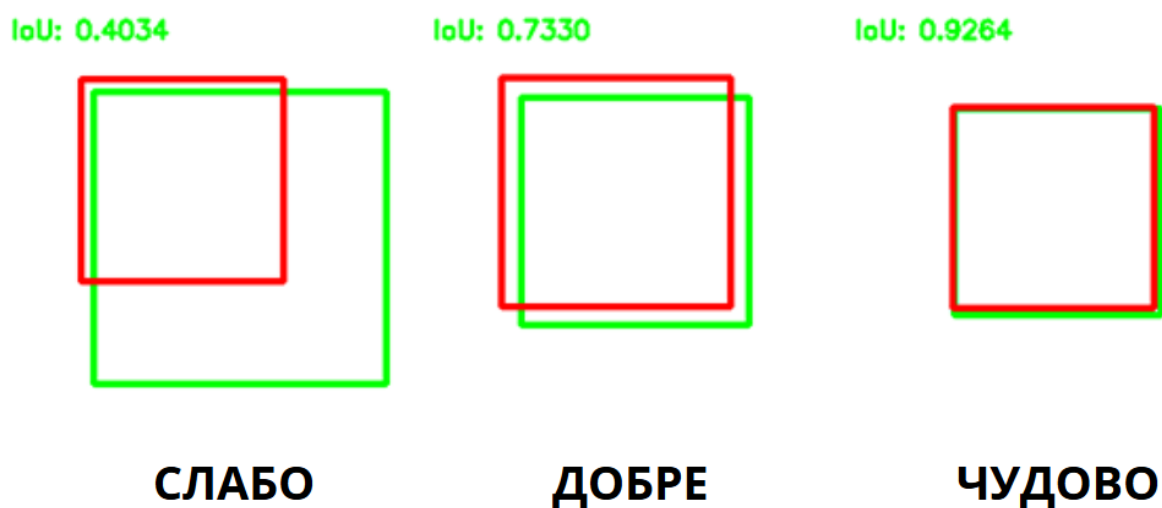


Рисунок 2 – Приклад коефіцієнта Жаккара

Для навчання моделей використовувалася функція бінарної крос-ентропії, яка визначається наступним чином:

$$IoU = \frac{TP}{TP+FP+FN} \quad (1)$$

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

де TP — кількість істинно позитивних передбачень;

FP — кількість хибно позитивних передбачень;

FN — кількість хибно негативних передбачень.

Дісе коефіцієнт результатів:

$$F1 = \frac{2*TP}{2*TP+FP+FN} \quad (2)$$

Ця метрика особливо корисна при оцінці якості сегментації, оскільки враховує як повноту, так і точність передбачень.

Функція втрат результатів:

$$L = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [y_i * \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) * \log(1 - \hat{y}_i)] \quad (3)$$

де N — кількість пікселів;

y_i - істинне значення пікселя i (0 або 1);

$\hat{y}_i$ - передбачене значення для пікселя i .

Ця функція втрат вимірює різницю між передбаченими ймовірностями та фактичними бінарними мітками для кожного пікселя.

Інференс: Після навчання моделі застосовувалися для автоматичної сегментації нових криомікроскопічних зображень. Результати інференсу порівнювалися з ручними анотаціями для оцінки точності та надійності моделей[10].

3. Візуалізація та аналіз результатів у Jupyter

Інтерактивний аналіз: Інтеграція з Jupyter Notebook дозволила дослідникам інтерактивно аналізувати результати інференсу. Було реалізовано відображення оригінальних зображень разом із сегментованими областями, побудова гістограм інтенсивності пікселів, теплових карт для візуалізації впевненості моделі та інших видів графіків.

Статистичний аналіз: У Jupyter проводився статистичний аналіз, включаючи обчислення середнього розміру клітин, їх щільності, а також виявлення аномальних патернів, які могли вказувати на помилки в анотації або інференсі [11].

4. Забезпечення масштабованості та відтворюваності за допомогою Docker

Контейнеризація: Усі компоненти системи, включаючи MinIO, CVAT, навчені моделі та скрипти для інференсу, були упаковані в Docker-контейнери. Це забезпечило ізоляцію середовищ, спростило процес розгортання та оновлення компонентів, а також дозволило легко масштабувати систему відповідно до обсягів даних та вимог до продуктивності.

Відтворюваність: Використання Docker забезпечило відтворюваність результатів досліджень. Кожен етап процесу був описаний у відповідних Docker-образах рис.3, що дозволило іншим дослідникам відтворити експерименти на своїх системах без необхідності налаштовувати оточення з нуля.

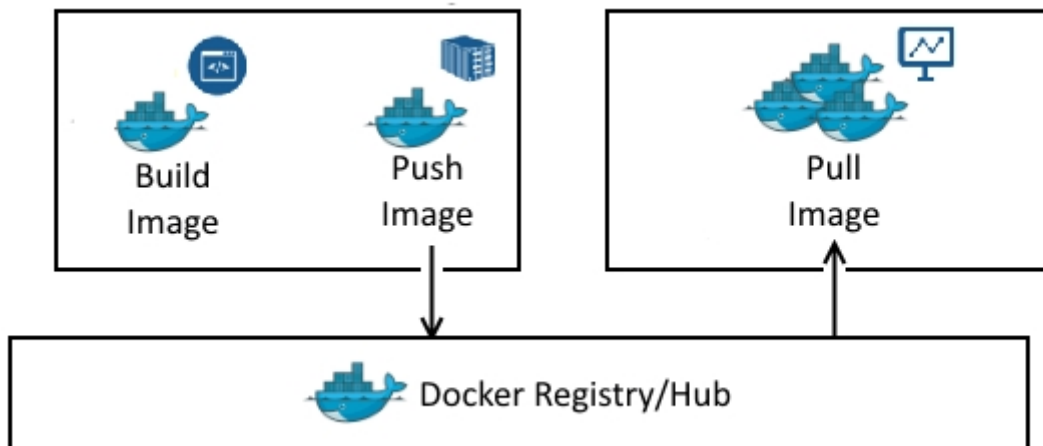


Рисунок 3 – Схема роботи Docker

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

5. Обговорення результатів

У ході дослідження були протестовані дві архітектури глибокого навчання для сегментації криомікроскопічних зображень: U-Net та Mask R-CNN. Результати показали, що Mask R-CNN перевершує U-Net у задачах сегментації клітин, які перекриваються, забезпечуючи більш точне розділення окремих екземплярів клітин[12]. Це узгоджується з висновками інших досліджень, де Mask R-CNN демонструє високу ефективність у сегментації об'єктів, які перекриваються (рис. 4).

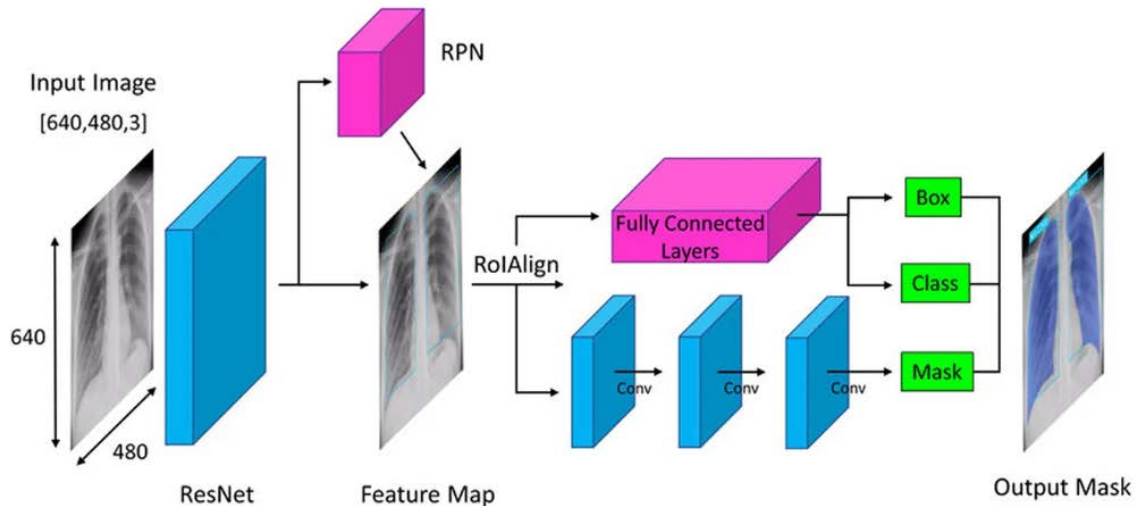


Рисунок 4 – Схема роботи Mask R-CNN

Проблеми та обмеження які можливі це дублювання анотацій: Коли клітини розташовані дуже близько одна до одної або перекриваються, модель може неправильно об'єднувати їх в одну структуру. Це призводить до ситуацій, коли дві або більше клітин вважаються однією, що спотворює результати сегментації та ускладнює подальший аналіз. Для вирішення цієї проблеми необхідно застосовувати методи, які враховують особливості перекриття клітин, наприклад, використання спеціалізованих архітектур нейронних мереж, таких як Mask R-CNN, які демонструють високу ефективність у сегментації об'єктів, які перекриваються.

Нерегулярні форми клітин: Клітини з атиповими або складними морфологіями становлять виклик для алгоритмів сегментації. Стандартні моделі можуть не враховувати всі особливості таких форм, що призводить до неточностей у визначенні меж клітин [13,17,18]. Для підвищення точності сегментації необхідно інтегрувати додаткові ознаки, такі як текстурні характеристики, які допомагають краще розрізняти клітини з подібними формами.

Обмежені дані для навчання: Невеликий обсяг розмічених даних може спричинити перенавчання моделі, коли вона добре працює на тренувальних даних, але не здатна ефективно узагальнювати на нових зображеннях. Це обмежує застосовність моделі в реальних умовах. Для подолання цієї проблеми можна використовувати методи аугментації даних або генеративні моделі, які дозволяють створювати синтетичні зображення для розширення навчального набору даних.

Які можливості для покращення у роботі ми бачимо, по перше це збільшення обсягу даних: Розширення навчального набору шляхом збору та анотації більшої кількості криомікроскопічних зображень сприятиме покращенню здатності моделі до узагальнення. Більший обсяг даних дозволяє моделі навчитися розпізнавати ширший спектр варіацій клітинних структур, що підвищує її стійкість до нових, раніше не бачених зразків [14].

Використання генеративних моделей: Застосування генеративно-змагальних мереж (GAN) для створення синтетичних зображень може значно збільшити різноманітність навчальних даних. Це особливо корисно при обмеженій кількості реальних зображень, оскільки синтетичні дані можуть імітувати різні варіації клітинних структур, покращуючи здатність моделі до узагальнення.

Тонке налаштування гіперпараметрів: Оптимізація гіперпараметрів моделі, таких як швидкість навчання, розмір міні-батчу та параметри регуляризації, може суттєво вплинути на продуктивність моделі.

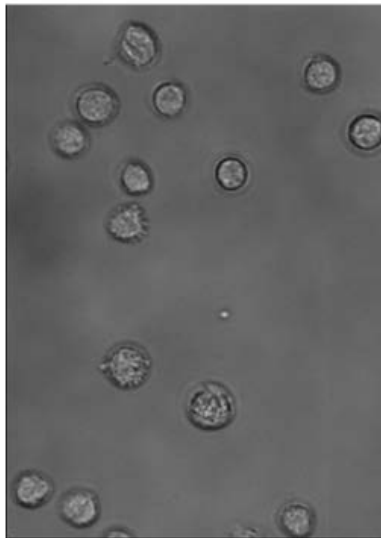
МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Наприклад, правильний вибір швидкості навчання забезпечує ефективне оновлення ваг моделі, а оптимальний розмір міні-батчу сприяє стабільності та швидкості навчання.

Інтеграція додаткових ознак: Включення інформації про текстуру, інтенсивність та інші характеристики зображень може покращити здатність моделі розрізняти клітини з подібними формами. Аналіз текстурних ознак дозволяє моделі враховувати дрібні деталі, які можуть бути важливими для точного розпізнавання та сегментації клітин[15]. Застосування цих підходів сприятиме підвищенню точності та надійності моделей сегментації клітин на криомікроскопічних зображеннях, що, в свою чергу, покращить якість біомедичних досліджень та діагностичних процесів.

Автоматизація процесу обробки криомікроскопічних зображень із використанням сучасних інструментів, таких як MinIO для зберігання даних, CVAT для анотації, а також глибоких нейронних мереж для сегментації, значно підвищує ефективність та точність аналізу клітинних структур рис.5.

Вхідне зображення



Після анотації

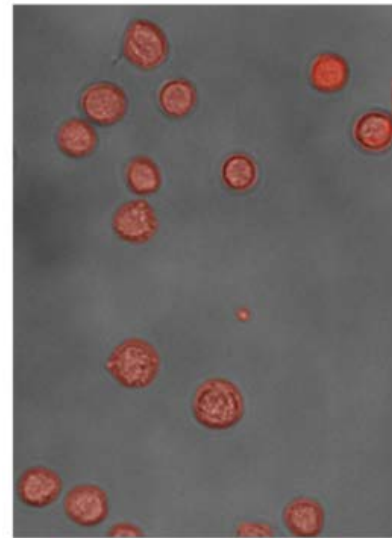


Рисунок 5 – Зображення після анотації

Для навчання Інтеграція з Jupyter забезпечує зручність візуалізації та аналізу результатів, а використання Docker сприяє відтворюваності та масштабованості процесу [16]. Незважаючи на досягнуті успіхи, подальші дослідження необхідні для вирішення виявлених проблем та покращення моделі, особливо щодо обробки клітин, які перекриваються та клітин з нерегулярними формами.

ВИСНОВКИ

У ході проведеного дослідження була розроблена та впроваджена комплексна система автоматизації обробки криомікроскопічних зображень, яка охоплює етапи збору, зберігання, анотації, навчання моделей глибокого навчання, інференсу та візуалізації результатів. Використання сучасних інструментів, таких як MinIO для надійного зберігання даних, CVAT для точної анотації зображень, а також архітектур глибокого навчання (наприклад, U-Net і Mask R-CNN) для сегментації клітинних структур, дозволило значно підвищити ефективність та точність аналізу. Інтеграція з Jupyter Notebook забезпечила зручність в аналізі та інтерпретації результатів, а застосування контейнеризації за допомогою Docker сприяло відтворюваності та масштабованості процесу.

Результати експериментів показали, що використання Mask R-CNN забезпечує більш точне розділення клітин, які перекриваються, порівняно з U-Net, що відповідає висновкам інших досліджень у цій галузі. Однак були виявлені певні обмеження, зокрема труднощі в обробці клітин з нерегулярними формами та випадки неправильного об'єднання близько розташованих клітин. Для подолання цих проблем рекомендується збільшити обсяг навчальних даних, використовувати генеративні моделі для

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

створення синтетичних зображень, оптимізувати гіперпараметри моделей та інтегрувати додаткові ознаки, такі як текстура та інтенсивність.

Загалом, автоматизація процесу обробки кріомікроскопічних зображень із застосуванням сучасних технологій та інструментів значно підвищує ефективність і точність аналізу клітинних структур, що сприяє прискоренню наукових досліджень та покращенню діагностики в біомедицині.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Самохін Ю. В. Аспекти сегментації кріомікроскопічних зображень / Ю. В. Самохін // Сучасні технології біомедичної інженерії : матеріали II міжнародної науково-технічної конференції 17–19 травня 2023 р. / за заг. ред. І. В. Прокоповича, Н. В. Манічевої ; Нац. ун-т «Одеська політехніка». — Вінниця : ТОВ «Торговий дім «Альфа і Омега», 2023. — С. 110 - 112.
2. Самохін Ю. В. Знаходження зображень клітин на кріомікроскопічних зображеннях за допомогою згорткових нейронних мереж / Ю. В. Самохін // Сучасний стан та перспективи біомедичної інженерії : матеріали Міжнар. наук.-прак. конф., присвяченої 125-річчю ювілею Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», 13-14 грудня 2023 р. — Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. — С. 194-195.
3. Самохін Ю. В. Алгоритми проходження контуру на кріомікроскопічних зображень / Ю. В. Самохін // Радіо-електроніка та молодь у XXI столітті : тези доповідей 27-го Міжнародного молодіжного форуму, 10–12 травня 2023 р. — Харків : ХНУРЕ, 2023. — Т. 1. — С. 99-100
4. Самохін Ю. В. Виявлення клітин на зображенні за допомогою CVAT AI / Ю. В. Самохін // Сучасні техно-логії біомедичної інженерії : матеріали III міжнародної науково-технічної конференції, 8–10 травня 2024 р. — Вінниця : ВНТУ, 2024. — С. 24-26.
5. Самохін Ю. В. Алгоритми проходження контуру на кріомікроскопічних зображень / Ю. В. Самохін // Тематична конференція «Актуальні питання біомедичної інженерії» в рамках 26-го Міжнародного молодіжного форуму «Радіоелектроніка та молодь в XXI столітті». 36. матеріалів конференції. Т. 1. — Харків : ХНУРЕ, 2022. — С. 86-87
6. Prykhodko M.V. Image processing for automated microscopic analysis of ice recrystallization process during iso-thermal annealing / M.V. Prykhodko, M.Y. Tymkovych, O.G. Avrunin, V.V. Mutsenko, O. Gryshkov, B. Glasmacher // Int J Bioelectromagnetism. — 2018. — Vol. 20(1). — P. 72–75.
7. Gryshkov O. Advances in cryopreservation of alginate-encapsulated stem cells and analysis of cryopreservation outcome // Oleksandr Gryshkov, Vitalii Mutsenko, Maksym Tymkovych, Dmytro Tarusin, Vera Sirotinskaya, Ido Braslavsky, Oleg Avrunin, Birgit Glasmacher// Cryobiology. — Vol. 85. — P. 156.
8. Tymkovych, O. Avrunin, O. Gryshkov, V. Semenets and B. Glasmacher, "Ice crystals microscopic images segmentation based on active contours", *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 493-496, 2019.
9. Tymkovych, O. Gryshkov, O. Avrunin, K. Selivanova, Y. Nosova, V. Mutsenko, et al., "Application of SOFA framework for physics-based simulation of deformable human anatomy of nasal cavity", IFMBE Proceedings, vol. 80, pp. 112-120, 2021.
10. Y. Samokhin, O. Avrunin and V. Yavtushenko, "Cell Detection Model on Cryomicroscopic Images Using MinIO and CVAT," 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 514-519, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755563.
11. M. Tymkovych, O. Gryshkov, K. Selivanova, V. Mutsenko, O. Avrunin and B. Glasmacher, "Application of artificial neural networks for analysis of ice recrystallization process for cryopreservation", *8th European Medical and Biological Engineering Conference (EMBE) 2021, pp. 102-111, Nov. 29 - Dec. 3, 2021. computer vision techniques," Przegląd Elektrotechniczny, 9 30 – 33 (2021) DOI [10.15199/48.2021.09.06](https://doi.org/10.15199/48.2021.09.06)
12. Detection of circulating tumour cells in peripheral blood with an automated scanning fluorescence micro-scope / T. Ntouroupi, S. Ashraf, S.McGregor [et al.] // British Journal of Cancer. — 2008. — Vol. 99, No. 5. — P. 789–795.
13. Detection and analysis of cancer cells in blood and bone marrow using a rare event imaging system / S. Kraeft, R. Sutherland, L. Gravelin [et al.] // Clinical Cancer Research: An Official Journal of the American Association for Cancer Research. — 2000. — Vol. 6, No. 2. — P. 434–442

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

14. Кожем'яко В. П. Оптико-електронні методи і засоби для обробки та аналізу біомедичних зображень [монографія] / В. П. Кожем'яко, С. В. Павлов, К. І. Станчук. – Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2006 – 203 с.
15. Maragos, P., Sofou, A., Stamou, G.B. et al. Image Analysis of Soil Micromorphology: Feature Extraction, Segmentation, and Quality Inference. EURASIP J. Adv. Signal Process. 2004, 356937 (2004).
16. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
17. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.
18. M. Banham and A. Katsaggelos, "Digital image restoration", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 14, no. 2, pp. 24-41, 1997.

REFERENCES

1. Samokhin Yu. V. Aspects of segmentation of cryomicroscopic images / Yu. V. Samokhin // Modern technologies of biomedical engineering: materials of the II international scientific and technical conference May 17–19, 2023 / edited by I. V. Prokopovych, N. V. Manicheva; National University "Odesa Polytechnic". — Vinnytsia: LLC "Trading House "Alpha and Omega", 2023. — P. 110 - 112.
2. Samokhin Yu. V. Finding cell images on cryomicroscopic images using convolutional neural networks / Yu. V. Samokhin // Current state and prospects of biomedical engineering: materials of the International Scientific and Practical Conference. conf. dedicated to the 125th anniversary of the National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", December 13-14, 2023 - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023. - P. 194-195.
3. Samokhin Yu. V. Algorithms for contour tracing on cryomicroscopic images / Yu. V. Samokhin // Radio electronics and youth in the XXI century: abstracts of the reports of the 27th International Youth Forum, May 10-12, 2023 - Kharkiv: KhNURE, 2023. - T. 1. - P. 99-100
4. Samokhin Yu. V. Cell detection in the image using CVAT AI / Yu. V. Samokhin // Modern technologies of biomedical engineering: materials of the III international scientific and technical conference, May 8–10, 2024 – Vinnytsia: VNTU, 2024. – P. 24-26.
5. Samokhin Yu. V. Algorithms of contour passage on cryomicroscopic images / Yu. V. Samokhin // Thematic conference “Current issues of biomedical engineering” within the framework of the 26th International Youth Forum “Radioelectronics and youth in the 21st century”. Collection of conference materials. T. 1. – Kharkiv: KhNURE, 2022. – P. 86-87.
6. Prykhodko M.V. Image processing for automated microscopic analysis of ice recrystallization process during iso-thermal annealing / M.V. Prykhodko, M.Y. Tymkovych, O.G. Avrunin, V.V. Mutsenko, O. Gryshkov, B. Glasmacher // Int J Bioelectromagnetism. – 2018. – Vol. 20(1). – P. 72–75.
7. Gryshkov O. Advances in cryopreservation of alginate-encapsulated stem cells and analysis of cryopreservation outcome // Oleksandr Gryshkov, Vitalii Mutsenko, Maksym Tymkovych, Dmytro Tarusin, Vera Sirotinskaya, Ido Braslavsky, Oleg Avrunin, Birgit Glasmacher// Cryobiology. – Vol. 85. – P. 156.
8. Tymkovych, O. Avrunin, O. Gryshkov, V. Semenets and B. Glasmacher, "Ice crystals microscopic images segmentation based on active contours", *2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), pp. 493-496, 2019.
9. Tymkovych, O. Gryshkov, O. Avrunin, K. Selivanova, Y. Nosova, V. Mutsenko, et al., "Application of SOFA framework for physics-based simulation of deformable human anatomy of nasal cavity", IFMBE Proceedings, vol. 80, pp. 112-120, 2021.
10. Y. Samokhin, O. Avrunin and V. Yavtushenko, "Cell Detection Model on Cryomicroscopic Images Using MinIO and CVAT," 2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv, Ukraine, 2024, pp. 514-519, doi: 10.1109/TCSET64720.2024.10755563.
11. M. Tymkovych, O. Gryshkov, K. Selivanova, V. Mutsenko, O. Avrunin and B. Glasmacher, "Application of artificial neural networks for analysis of ice recrystallization process for cryopreservation", *8th European Medical and Biological Engineering Conference (EMBEC 2021),

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

- pp. 102-111, Nov. 29 - Dec. 3, 2021. computer vision techniques,” Przegląd Elektrotechniczny, 9 30 –33 (2021) DOI [10.15199/48.2021.09.06](https://doi.org/10.15199/48.2021.09.06)
12. Detection of circulating tumour cells in peripheral blood with an automated scanning fluorescence micro-scope / T. Ntouriopi, S. Ashraf, S. McGregor [et al.] // British Journal of Cancer. – 2008. – Vol. 99, No. 5. – P. 789–795.
 13. Detection and analysis of cancer cells in blood and bone marrow using a rare event imaging system / S. Kraeft, R. Sutherland, L. Gravelin [et al.] // Clinical Cancer Research: An Official Journal of the American Association for Cancer Research. – 2000. – Vol. 6, No. 2. – P. 434–442
 14. Kozhem'yako V. P. Optical-electronic methods and tools for processing and analyzing biomedical images [monograph] / V. P. Kozhem'yako, S. V. Pavlov, K. I. Stanchuk. – Vinnytsia: UNIVERSUM, 2006 – 203 p.
 15. Maragos, P., Sofou, A., Stamou, G.B. et al. Image Analysis of Soil Micromorphology: Feature Extraction, Segmentation, and Quality Inference. EURASIP J. Adv. Signal Process. 2004, 356937 (2004).
 16. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
 17. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.
 18. M. Banham and A. Katsaggelos, "Digital image restoration", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 14, no. 2, pp. 24-41, 1997.

Надійшла до редакції 20.04.25 р.

САМОХІН ЮРІЙ ВІКТОРОВИЧ – аспірант кафедри біомедичної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, **e-mail: yurii.samokhin@nure.ua**

АВРУНІН ОЛЕГ ГРИГОРОВИЧ – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри біомедичної інженерії, Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна, **e-mail: oleh.avrunin@nure.ua**

YURII SAMOKHIN, OLEG AVRUNIN

AUTOMATION OF THE FULL CYCLE OF CRYOMICROSCOPIC IMAGE PROCESSING: FROM COLLECTION TO ANALYSIS

Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК 004.94:336.7

Р. Н. КВЕТНИЙ, С.І. БОРОДКІН

ПОКРАЩЕНА МОДЕЛЬ РЕГУЛЯРИЗАЦІЇ ELASTIC NET ДЛЯ ОБРОБКИ ФІНАНСОВИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ

*Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, Вінниця, Україна,
e-mail:borserq90@gmail.com*

Анотація: У статті запропоновано модифікацію Elastic Net-регресії для короткострокового прогнозування фінансових часових рядів шляхом введення гаусівського затухання ваг (Gaussian decay). Новий підхід спрямований на згладжування різких «стрибків» між останнім історичним і першим прогнозним значеннями, характерних для стандартної регуляризації. Для оцінки ефективності було формально виписано Elastic Net з чотирма схемами затухання ваг (без затухання, лінійне, експоненційне, гаусівське) та проведено емпіричні експерименти на даних індексів S&P 500, Dow Jones Industrial Average і Nasdaq Composite за 2020–2025 рр. Результати продемонстрували, що Gaussian decay мінімізує перехідний розрив і забезпечує найнижчі значення RMSE і Deviation для S&P 500 і Nasdaq, тоді як для Dow Jones оптимальною виявилася експоненційна схема.

Ключові слова: Elastic Net, Gaussian-затухання, часові ряди, обробка даних, фінансове прогнозування, вагове зважування, S&P 500, Dow Jones, Nasdaq Composite

Abstract. This paper proposes a modification of Elastic Net regression for short-term forecasting of financial time series by introducing Gaussian weight decay. The new approach is designed to smooth the abrupt “jumps” between the last historical observation and the first forecast—an issue typical of standard regularization. To assess its effectiveness, we formally derive the Elastic Net model with four weighting schemes (no decay, linear, exponential, and Gaussian) and conduct empirical experiments on the S&P 500, Dow Jones Industrial Average, and Nasdaq Composite indices over the period 2020–2025. The results demonstrate that Gaussian decay minimizes the transition gap and achieves the lowest RMSE and Deviation for the S&P 500 and Nasdaq Composite, whereas exponential decay proves optimal for the Dow Jones Industrial Average.

Keywords: Elastic Net, Gaussian weight decay, time series data processing, time series forecasting, financial markets, adaptive weighting, S&P 500, Dow Jones, Nasdaq Composite

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-29-35

ВСТУП

Прогнозування фінансових часових рядів залишається актуальною проблемою через складну структуру ринкових даних, що включають волатильність, наявність структурних змін та викидів. Класичні методи регуляризації, зокрема Elastic Net, який комбінує штрафи L_1 та L_2 для одночасного відбору ознак і зменшення мультиколінеарності. Цей метод довів свою ефективність у багатьох задачах регресії завдяки збалансованому поєднанню жорсткого відсікання незначущих змінних і плавного стискання великих коефіцієнтів [1].

Однак при застосуванні Elastic Net до прогнозування часових рядів часто спостерігається різкий «стрибок» між останнім історичним значенням і першим кроком прогнозу, що знижує довіру до моделі. Для адаптації до нестабільності часового ряду застосовують часове зважування спостережень: свіжі дані отримують вищі ваги, старі – нижчі.

Так, для прогнозування часових рядів було запропоновано TWLS (Time-Weighted Least Squares), яке показало статистично значущу перевагу над звичайною регресією завдяки більшому врахуванню останніх спостережень [3]. У сфері регуляризованих моделей впроваджено Lag-weighted Lasso – модифікацію Lasso з різними коефіцієнтами штрафу залежно від лагу предиктора, а для підвищення робастності до викидів реалізовано вагові схеми на основі М-оцінок [4].

Таким чином, сучасні дослідження підтверджують доцільність поєднання регуляризації (для боротьби з перенавчанням і вибору важливих лагів) та часового вагування даних (для акцентування уваги на свіжих спостереженнях) при моделюванні фінансових часових рядів.

Метою роботи є підвищення точності прогнозування фінансових часових рядів за допомогою Elastic Net із адаптивним ваговим затуханням (лінійним, експоненційним та гаусівським), при якому оптимальні гіперпараметри підбираються через крос-валідацію, а ваги спостережень змінюються так, щоб мінімізувати «стрибок» між останнім історичним і першим прогнозним значеннями.

1. ПОСТАНОВКА ELASTIC NET – МОДЕЛІ З РІЗНИМИ СХЕМАМИ ЗАТУХАННЯ ВАГ

Часто фінансові часові ряди характеризуються множинними змінами, які мають нелінійну природу та неоднорідну дисперсію. Для стабілізації дисперсії і перетворення мультиплікативних змін у адитивні використовується логарифмічне перетворення. Крім того, застосування щомісячних значень замість щоденних дозволяє зменшити рівень шуму і поліпшити довгострокову прогнозованість [5].

Нехай маємо часовий ряд y_t – значення $\log$ -індексу на місяць t .

Для прогнозування використовуються лагові ознаки:

$$x_{t,k} = y_{t-k}, \quad (1)$$

де $k = 1, 2, \dots, p$ – номер лагу, p – максимальний лаг.

Тоді одноперіодний прогноз моделі можна записати як лінійну комбінацію лагів:

$$\hat{y}_{t+1} = \beta_0 + \sum_{k=1}^p \beta_k y_{t+1-k} + \varepsilon_t, \quad (2)$$

де β_0 – константа, β_k – коефіцієнти регресії при k -му лагу, ε_t – шум.

Такий опис відповідає моделям авторегресії (AR), де поточне значення часового ряду змінюється як лінійна комбінація минулих значень [6].

Для оцінювання параметрів β використовується метод найменших квадратів з ElasticNet-регуляризацією. У загальному випадку, за наявності вагових коефіцієнтів w_i для кожного спостереження (x_i, y_i) , оцінка параметрів знаходиться з розв'язку задачі мінімізації функції втрат:

$$\hat{\beta} = \arg \min_{\beta_0, \beta} \left\{ \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N w_i (y_i - \beta_0 - x_i^T \beta)^2 + \lambda \left(\alpha \|\beta\|_1 + \frac{1-\alpha}{2} \|\beta\|_2^2 \right) \right\}, \quad (3)$$

де N – кількість спостережень у навчальній вибірці, w_i – вага i -го спостереження, $x_i = (y_{i-1}, \dots, y_{i-p})^T$ – вектор лагових предикторів, $\beta = (\beta_1, \dots, \beta_p)^T$ – вектор коефіцієнтів, β_0 – вільний член (intercept), $\lambda > 0$ – параметр регуляризації, $\alpha \in [0, 1]$ – параметр, що визначає співвідношення між L_1 та L_2 -штрафами. При $\alpha = 1$ модель (3) еквівалентна Lasso, при $\alpha = 0$ – гребеневій регресії, а при $0 < \alpha < 1$ власне ElasticNet-регресії.

Регуляризація зменшує модульні значення коефіцієнтів β_k , а при достатньо великому λ деякі з них стають рівними нулю, що автоматично здійснює відбір важливих лагів. Під час навчання λ та α підбираються автоматично методом крос-валідації [1,2,4].

Вага w_i визначає значущість i -го спостереження при навчанні моделі. У рівнянні (3) через множники w_i вплив квадратів помилок кожного спостереження на функцію втрат є неоднаковим. Ми розглядаємо чотири схеми задання ваги як функції від порядкового номера спостереження (або його віку) у вибірці [1]:

$$w_i = \begin{cases} 1, & \text{рівномірне (без зважування);} \\ \frac{1}{N}, & \text{лінійне зважування;} \\ \exp(-\lambda_w (N - i)), & \text{експоненціальне зважування;} \\ \exp\left[-\frac{(N - i)^2}{2\sigma_w^2}\right], & \text{гаусівське зважування.} \end{cases} \quad (4)$$

Перша схема (рівномірна) означає відсутність ваг – всі спостереження внесуть однаковий вклад ($w_i = 1$ для всіх i). Лінійна схема задається вагами, що зростають пропорційно номеру спостереження: найбільш давнє спостереження отримає вагу $\frac{1}{N}$, а найновіше – 1 [2]. Експоненціальна схема передбачає геометричне згасання ваг: параметр $\lambda_w > 0$ визначає швидкість експоненційного зменшення ваги зі збільшенням віку спостереження. Нарешті, гаусівська схема реалізує "віконне" ядро, зосереджене на останніх спостереженнях: коефіцієнт σ_w визначає ширину "вікна" (стандартне відхилення гаусівської функції), в межах якого дані отримують значну вагу, тоді як дуже старі спостереження (на відстані більше кількох σ_w від останнього) мають мізерно малі w_i [4,7]. В усіх схемах більш пізні спостереження отримують не меншу вагу, ніж більш ранні (для рівномірної всі рівні).

Таким чином, реалізується принцип забування застарілої інформації: модель більше фокусується на нових даних, що потенційно відображають актуальні ринкові умови.

2. МЕТОДОЛОГІЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Для аналізу використано часові ряди популярних фондових індексів S&P 500, Dow Jones та Nasdaq Composite. Спершу до даних застосовано логарифмічне перетворення: $y_t = \log(Index_t)$. Це робиться з метою стабілізації дисперсії ряду та перетворення мультиплікативних змін у адитивні. Далі з отриманого ряду сформовано ознаки – лагові значення $y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_{t-p}$. В нашому дослідженні обрано максимальне лагове число $p = 10$, що відповідає використанню даних за останніх десяти місяців для прогнозування наступного місяця. Вектор цільової змінної при навчанні зміщено на один крок вперед відносно ознак: для кожного часу t (починаючи з p -го спостереження) входними даними є $x_t = (y_{t-1}, \dots, y_{t-p})$, а виходом моделі – прогноз $\hat{y}_t$ поточного значення (яке порівнюється з фактичним y_t). У нашому випадку для кожного з чотирьох індексів сформовано окремий навчальний набір: ознаки складаються виключно з лагових значень того ж самого індексу, а ціль – його власне значення наступного місяця. Таким чином, було підготовлено чотири незалежні датасети (по одному для S&P 500, Dow Jones та Nasdaq) без «перемішування» даних між різними індексами. Це означає, що моделі будувалися для кожного індексу окремо, враховуючи лише власну динаміку кожного ряду [5,6].

Для моделювання було обрано лінійну регресійну модель Elastic Net, яка комбінує L1 та L2-регуляризацию з крос-валідацією. Для цього, вибірка розбивається на навчальну та тестову частини. Для оцінки узагальнюючої здатності моделі та підбору оптимальних гіперпараметрів λ і α використано процедуру крос-валідації. Зокрема, у навчальній вибірці виконано k -складову часову крос-валідацію: дані поділено на $k = 10$ послідовних інтервалів часу; модель навчалася на перших $(k - 1)$ інтервалах і перевірялася на наступному інтервалі, що повторювалося k разів зі зміщенням вікна. Такий підхід (rolling-origin evaluation) дозволяє уникнути «заглядання в майбутнє» при валідації та коректно оцінити параметри на часових рядах. На кожній ітерації крос-валідації підбиралося оптимальне значення λ (через перебір декількох десятків кандидатів по логарифмічній шкалі) та параметр α (перебором декількох значень від 0 до 1). Критерієм вибору була мінімальна середня квадратична помилка на валідаційних інтервалах. Для реалізації навчання використано стандартний алгоритм координатного спуску (реалізація python sklearn), що розв'язує задачу (3) з врахуванням вагових коефіцієнтів. В процесі навчання моделі з вагуванням лінійним, експоненційним та гаусівським вага старіших спостережень автоматично зменшується, що зменшує їх вплив на оцінку параметрів і, як очікується, підвищує стабільність моделі до зміни тренду [1,2].

Після налаштування гіперпараметрів модель було перенавчано на всій навчальній вибірці і отримано фінальні оцінки β_0, β . Для кожної вагової схеми (включно з випадком без ваг) побудовано прогнозні значення $\hat{y}_t$ на тестовому відрізку даних (який моделі не бачили при навчанні). Прогноз здійснювався ітеративно в режимі одномісячного горизонту: використовуючи фактичні значення

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

попередніх p місяців для кожного кроку вперед. З отриманих логарифмічних прогнозів $\hat{y}_t$ виконано зворотнє перетворення для отримання $\hat{Y}_t$ – прогнозів індексу [2,5].

Для оцінювання якості прогнозування було обрано дві метрики: середньоквадратична помилка прогнозу (RMSE) та відхилення першого прогнозного значення від останнього історичного (Deviation).

Середньоквадратична помилка (RMSE) є універсальною метрикою, яка дозволяє оцінити точність прогнозування, приділяючи більше уваги великим похибкам [8]:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (y_t - \hat{y}_t)^2}, \quad (5)$$

де y_t – фактичні значення, $\hat{y}_t$ – прогнозні значення, N – кількість прогнозних значень.

Deviation (відхилення першого прогнозного значення від останнього історичного):

$$Deviation = |y_{t+1} - y_t|, \quad (6)$$

де y_t – останнє історичне значення перед прогнозним періодом, y_{t+1} – перше прогнозоване значення.

Deviation використовується для оцінки плавності переходу від історичних до прогнозних значень, що особливо важливо в контексті фінансових рядів, де різкі скачки можуть свідчити про недостатню адаптивність моделі.

Ці дві метрики дозволяють комплексно оцінити якість моделі, враховуючи як загальну точність прогнозу, так і специфічну поведінку моделі на межі між історичним і прогнозним періодами.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Нижче наведено результати прогнозування на тестовому відрізку з 30.09.2024 по 31.05.2025 (історичні дані з 01.01.2020 по 30.09.2024) для індексів S&P 500, Dow Jones, Nasdaq Composite з використанням моделі Elastic Net за чотирма різними ваговими схемами. Таблиця 1 містить значення RMSE, показника Deviation (різниця між першим прогнозом і останнім фактичним значенням навчальної вибірки) та коефіцієнтів α , λ , σ , які були підібрані за допомогою крос-валідації для кожної комбінації індексу та вагової схеми.

Таблиця 1

Порівняльний аналіз результатів регресії для індексів S&P 500, Dow Jones та Nasdaq Composite з різними ваговими схемами згущаннями.

Індекс	Вагова схема	RMSE	Deviation	α	λ	σ
S&P500	none (без wag)	0.041635	-84.6942	0.000452	1	-
S&P500	linear	0.035143	41.4909	0.000452	1	-
S&P500	exponential	0.035846	45.0944	0.000728	1	-
S&P500	gaussian	0.034833	19.56642	0.000452	1	0.57551
Dow Jones (DJIA)	none (без wag)	0.059641	-975.508	0.000174	0.9	-
Dow Jones (DJIA)	linear	0.046607	-126.452	0.000108	1	-
Dow Jones (DJIA)	exponential	0.045999	-212.089	0.000174	0.9	-
Dow Jones (DJIA)	gaussian	0.052202	-595.758	0.000174	1	0.6041
Nasdaq Composite	none (без wag)	0.063502	-273.448	2.59E-05	0.9	-
Nasdaq Composite	linear	0.052625	34.60765	6.72E-05	1	-
Nasdaq Composite	exponential	0.04665	207.0917	1.61E-05	1	-
Nasdaq Composite	gaussian	0.04098	-161.963	0.001887	1	0.2

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Проведений експеримент із застосуванням Elastic Net-перспекції з різними схемами вагового затухання до прогнозування фондових індексів (S&P 500, Dow Jones і NASDAQ Composite) продемонстрував, що вибір схеми суттєво впливає на точність прогнозу.

Для Dow Jones (DJIA) найкращий результат за показником RMSE показала експоненційна вагова схема ($RMSE = 0.045999$). Водночас усі моделі демонструють значні негативні відхилення, що свідчить про систематичну недооцінку прогнозованих значень, особливо у випадку моделі без ваг ($Deviation = -975.508$).

Для NASDAQ Composite найнижче значення RMSE (0.04098) отримано з використанням гаусівського затухання. Проте помітним є також значення $Deviation = -161.963$, що свідчить про деяку систематичну недооцінку. Водночас експоненційна схема показує трохи гірший RMSE, але позитивне зміщення ($Deviation = 207.0917$), що вказує на переоцінювання прогнозу.

Для індексу S&P 500 найменше значення RMSE (0.034833) і найменше абсолютне відхилення від фактичних значень ($Deviation = 19.56642$) забезпечила модель із застосуванням гаусівського затухання. Ця модель, на відміну від інших, має оптимальний баланс параметрів регуляризації ($\alpha = 0.000452$, $\lambda = 1$, $\sigma = 0.57551$), завдяки чому модель найбільш точно враховує останні тенденції ринку.

Для візуального порівняння точності моделей і оцінки їхньої відповідності реальним даним для прикладу наведемо графік прогнозних і фактичних значень індексу S&P 500 за різними схемами вагового затухання Рис. 1:

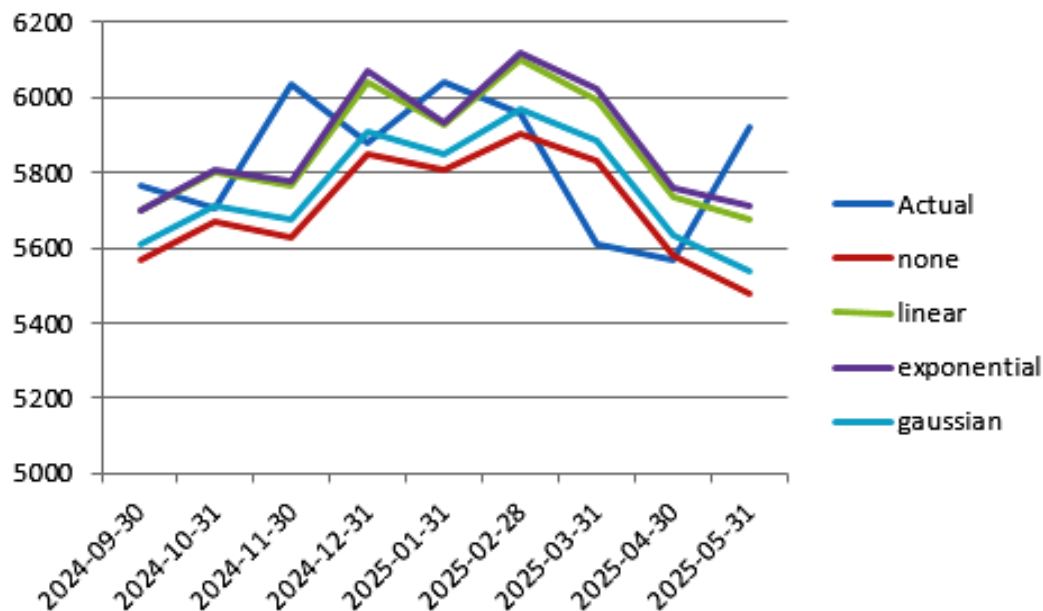


Рисунок 1 – Графік прогнозу індексу S&P 500

На цьому графіку чітко видно, що прогноз з гаусівського затуханням найточніше відповідає фактичним значенням, мінімізуючи помилку особливо у другій половині періоду прогнозування.

Для кращого розуміння характеру впливу даних різної давності на прогноз, наведемо також графік вагових коефіцієнтів для кожної з використаних схем Рис.2.

Графік вагових коефіцієнтів дозволяє краще зрозуміти характер використання інформації у моделях. Для моделі без ваг (none) всі спостереження мають однаковий внесок, незалежно від їх давності. Лінійна схема поступово збільшує вагу новіших спостережень, тоді як експоненційна швидко підвищує вагу нових даних та знижує значення старіших. Гаусівська схема має найбільш різке зменшення ваг старіших спостережень, зосереджуючи практично всю увагу моделі лише на найсвіжіших точках, що і є причиною її найвищої точності в умовах нестабільних фінансових рядів.

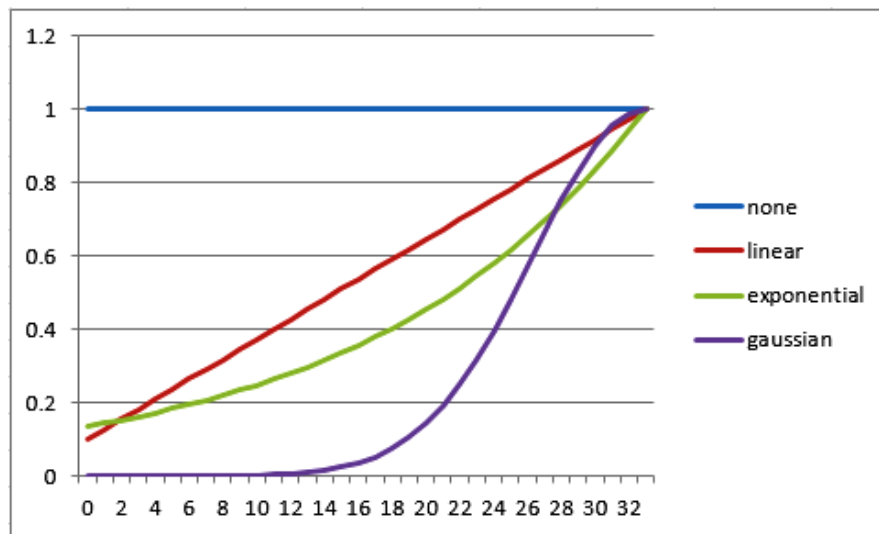


Рисунок 2 – Графік вагових коефіцієнтів різних індексів S&P 500

Таким чином, використання вагового затухання у прогнозуванні фінансових часових рядів суттєво покращує якість прогнозу, а гаусівське затухання є оптимальним рішенням для прогнозування динаміки індексу S&P 500.

ВИСНОВКИ

У статті запропоновано модифікацію ElasticNet-регресії з адаптивним вагуванням (рівномірна, лінійна, експоненціальна та гаусівська схеми) для короткострокового прогнозування індексів S&P 500, Dow Jones і Nasdaq Composite за даними 2020–2025 рр.

Експерименти показали, що Gaussian decay виявився оптимальним для S&P 500 і Nasdaq (найнижчий RMSE і мінімальне відхилення), у той час як exponential decay дав найкращий результат для Dow Jones. Схема без вагування продемонструвала найнижчу точність.

Модель з Gaussian decay найкраще себе показала при прогнозуванні індексу S&P 500 з найнижчими $RMSE = 0.034833$ та мінімальним абсолютним відхиленням $Deviation = 19.56642$. Вона досягла цього за рахунок оптимального поєднання параметрів регуляризації: $\alpha = 0.000452$, $\lambda = 1$ та $\sigma = 0.57551$, що дозволяє максимально точно відобразити останні ринкові тенденції. Зокрема, Gaussian decay є перспективним підходом, який забезпечує стійке поліпшення точності прогнозу порівняно з традиційними методами, що не диференціюють давність даних. Перспективи подальших досліджень включають випробування запропонованої методології на інших частотах даних (наприклад, денних або кварталних інтервалах), введення нових метрик, а також множинної регресії між багатьма змінними.

Загалом, результати роботи підтверджують, що врахування часового фактору давності даних через вагові коефіцієнти є дієвим засобом підвищення точності прогнозування фінансових часових рядів і може бути рекомендовано для практичного використання у фінансовій аналітиці та ризик менеджменті.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd edition. Springer, – 2009 – 533p, <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>.
2. Zou H., Hastie T. *Regularization and variable selection via the elastic net*. J. R. Stat. Soc. Series B, 2005, 67(2): 301–320, <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x>.
3. Wang Y., Hao X., Wu C. *Forecasting stock returns: A time-dependent weighted least squares approach*. Journal of Financial Markets, 2021, 53: 100568, <https://doi.org/10.1016/j.finmar.2020.100568>.
4. Dikheel T.R., Yaseen A.Q. *Robust lag weighted lasso for time series model*. J. Modern Applied Statistical Methods, 2021, 19(1): 14, <https://doi.org/10.56801/10.56801/v19.i.1081>.
5. Lütkepohl, H., Xu, F. *The role of the log transformation in forecasting economic variables*. Empir Econ 42, 2012, 619–638, <https://doi.org/10.1007/s00181-010-0440-1>.
6. Tsay R.S. *Analysis of Financial Time Series*. 2nd ed. Wiley, 2010, <https://doi.org/10.1002/9780470644560>.

7. E. S. Gardner Jr., *Exponential Smoothing: The State of the – Part II*. International Journal of Forecasting, 22(4), 637–666, <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.005>
8. R.J. Hyndman, A.B. Koehler. *Another look at measures of forecast accuracy*. Int. J. Forecast., 2006, 22(4):679–688, <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>

REFERENCES

1. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. 2nd edition. Springer, – 2009 – 533p, <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>.
2. Zou H., Hastie T. *Regularization and variable selection via the elastic net*. J. R. Stat. Soc. Series B, 2005, 67(2): 301–320, <https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2005.00503.x>.
3. Wang Y., Hao X., Wu C. *Forecasting stock returns: A time-dependent weighted least squares approach*. Journal of Financial Markets, 2021, 53: 100568, <https://doi.org/10.1016/j.finmar.2020.100568>.
4. Dikheel T.R., Yaseen A.Q. *Robust lag weighted lasso for time series model*. J. Modern Applied Statistical Methods, 2021, 19(1): 14, <https://doi.org/10.56801/10.56801/v19.i.1081>.
5. Lütkepohl, H., Xu, F. *The role of the log transformation in forecasting economic variables*. Empir Econ 42, 2012, 619–638, <https://doi.org/10.1007/s00181-010-0440-1>.
6. Tsay R.S. *Analysis of Financial Time Series*. 2nd ed. Wiley, 2010, <https://doi.org/10.1002/9780470644560>.
7. E. S. Gardner Jr., *Exponential Smoothing: The State of the – Part II*. International Journal of Forecasting, 22(4), 637–666, <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.005>
8. R.J. Hyndman, A.B. Koehler. *Another look at measures of forecast accuracy*. Int. J. Forecast., 2006, 22(4):679–688, <https://doi.org/10.1016/j.ijforecast.2006.03.001>

Надійшла до редакції 25.03.25 р.

КВЕТНИЙ РОМАН НАУМОВИЧ – д.т.н., професор кафедри Автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна **e-mail: rkvetny@vntu.edu.ua;**

БОРОДКІН СЕРГІЙ ІВАНОВИЧ – аспірант кафедри Автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, **e-mail: borserg90@gmail.com.**

R.N. KVYETNYYY, S.I. BORODKIN

IMPROVED MODEL OF ELASTIC NET REGULARIZATION FOR FINANCIAL TIME SERIES

Vinnytsia National Technical University

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК 004.93

М. І. КРИВОШЕЯ

ДОСЛІДЖЕННЯ ФЕНОМЕНУ ПОДВІЙНОГО СПУСКУ ТА ПОРІВНЯННЯ МІНІМАКСНОЇ АПРОКСИМАЦІЇ З L2-РЕГУЛЯРИЗАЦІЄЮ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна*

Анотація. У цій роботі досліджено феномен подвійного спуску та запропоновано використання мінімаксної апроксимації (L_∞ -норма) як альтернативу L2-регуляризації для покращення якості апроксимації моделей. Подвійний спуск описує залежність похибки від складності моделі: похибка спершу зменшується, потім зростає через перенавчання, а далі знову знижується. Проте в експериментах із моделлю без регуляризації було виявлено переважно зростаючу тенденцію похибки із короткими періодами спаду, що свідчить про неповний прояв феномену. Це, ймовірно, пов'язано з аномальними точками в даних, які спричинили експоненційне зростання похибки на високих ступенях. Було розглянуто три підходи: класичну модель без регуляризації, модель із L2-регуляризацією та мінімаксну апроксимацію. L2-регуляризація додала штраф за велику норму коефіцієнтів, що дозволило стабілізувати похибку та запобігти перенавчанню, особливо на високих ступенях полінома (200+). Мінімаксна апроксимація мінімізувала максимальну похибку, завдяки чому забезпечувала кращу стійкість до аномалій і перевершувала L2-регуляризацію на низьких ступенях (до 50). Результати підтвердили, що мінімаксна апроксимація є більш ефективною для задач із аномаліями, тоді як L2-регуляризація краще працює на складних моделях із високими ступенями полінома. Отримані висновки сприяють розширенню розуміння феномену подвійного спуску й показують практичну користь різних підходів у залежності від особливостей даних і вимог до моделі.

Ключові слова: подвійний спуск, L2-регуляризація, мінімаксна апроксимація, поліноміальні моделі, машинне навчання, аномалії.

Abstract. This paper investigates the phenomenon of double descent and proposes the use of minimax approximation (L_∞ -norm) as an alternative to L2-regularization to improve the quality of model approximation. Double descent describes the dependence of the error on the complexity of the model: the error first decreases, then increases due to overfitting, and then decreases again. In contrast, in experiments with a model without regularization, a predominantly increasing trend of the error with short periods of decline was found, which is observed for an incomplete manifestation of the phenomenon. This is probably due to anomalous points in the data that caused an exponential increase in the error at high powers. Three approaches were noted: a classical model without regularization, a model with L2-regularization, and minimal approximation. L2 regularization added a penalty for large coefficient norms, which stabilized the error and prevented overfitting, especially at high polynomial degrees (200+). Minimax approximation minimized the error, thereby providing better maximum anomaly robustness and outperforming L2 regularization at low degrees (up to 50). The results confirmed that minimax approximation is more effective for problems with anomalies, while L2 regularization performs better on complex models with high polynomial degrees. The findings contribute to the understanding of the double descent phenomenon and show the practicality of applying different approaches due to data features and model requirements.

Keywords: double descent, L2 regularization, minimax approximation, polynomial models, machine learning, anomalies.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-36-43

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ВСТУП

У сучасному машинному навчанні прогнозування складних залежностей у даних є важливим завданням, яке дозволяє розширити можливості моделей у різних галузях, включаючи економіку, медицину та інженерію. Одним із викликів є подолання проблем, пов'язаних із перенавчанням, шумом у даних та аномаліями. Одним із феноменів у цьому контексті є феномен подвійного спуску. Цей ефект демонструє два мінімуми похибки, між якими спостерігається різке зростання через перенавчання, що викликане надмірною складністю моделі.[4] У цій залежності спостерігається зменшення похибки на початкових етапах, її різке зростання через перенавчання, а також подальше зниження при збільшенні складності моделі. Феномен подвійного спуску має практичне значення у багатьох сферах.

У фінансовому секторі складні моделі прогнозування ризиків використовуються для виявлення фінансових шахрайств, але перенавчання може призводити до неправильної класифікації транзакцій.

У медицині при аналізі медичних зображень (наприклад, МРТ чи КТ) використання складних моделей глибокого навчання іноді викликає перенавчання, що знижує точність діагностики. Робота з шумовими даними та аномаліями є критичною для підвищення ефективності систем підтримки прийняття рішень.

У сфері самокерованих автомобілів складні алгоритми обробки даних сенсорів (камер, лідарів) стикаються з викликами шуму та аномальних даних, що може впливати на здатність правильно реагувати на нестандартні ситуації.

У реальних умовах дана теоретична поведінка часто змінюється через наявність шуму та аномалій у вибірках, що призводить до нестабільності моделей і зростання похибок. Класичні методи, такі як L2-регуляризація (Ridge), допомагають зменшити перенавчання, але виявляються менш ефективними для задач, де дані містять аномальні точки. Натомість мінімаксна апроксимація, яка базується на мінімізації максимальної похибки (L_∞ -норма), пропонує ефективніший підхід до роботи з даними, забрудненими аномаліями.[2]

Актуальність дослідження полягає у порівнянні двох підходів: L2-регуляризації та мінімаксної апроксимації, у контексті задач регресії, що містять аномальні точки і шум. Проведені експерименти дозволяють оцінити ефективність кожного методу на різних рівнях аномалій (10%, 30%, 50%, 70%, 90%) та шуму ($\sigma = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9$).

Метою роботи є дослідження феномену подвійного спуску в реальних умовах із аномаліями та шумом, а також розробка рекомендацій щодо вибору оптимального підходу для регуляризації. Результати дослідження спрямовані на підвищення стійкості та точності моделей, що є критично важливим у задачах машинного навчання та інженерії.

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Для проведення експерименту було створено навчальну вибірку з 70 точок, цільова залежність моделювала синусоїду з додаванням випадкового шуму. Щоб змоделювати реальні умови, у вибірку додали аномальні точки, які становили 40% від загальної кількості. Значення аномалій створювалися шляхом додавання випадкових зсувів із діапазону $[-15, -5] \cup [5, 15]$ до координат y , що дозволило зімітувати ситуації, в яких дані містять помітні викиди. Такий підхід дав змогу оцінити стійкість різних методів регресії до впливу аномальних точок. [3]

Дослідження виконано на трьох моделях:

Модель без регуляризації. Розрахунок коефіцієнтів здійснювався шляхом мінімізації середньоквадратичної похибки (MSE):

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2, \quad (1)$$

де y_i – реальне значення, $\hat{y}_i$ – прогноз моделі

Алгоритм виконання для моделі без регуляризації:

1. Згенерувати навчальну вибірку з цільовою залежністю, що моделює синусоїду з шумом.
2. Використати метод псевдообернення матриці для обчислення вагових коефіцієнтів:

$$w = (X^T X)^{-1} X^T y$$

де X – матриця ознак.

3. Застосувати отримані коефіцієнти w до тестових даних для прогнозування $\hat{y}_i$

4. Обчислити середньоквадратичну похибку між прогнозами та реальними значеннями тестової вибірки.

Модель із L2-регуляризацією (Ridge). Ця модель додає штраф за велику норму коефіцієнтів:

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

$$\min_w \|Xw - y\|_2^2 + \alpha \|w\|_2^2, \quad (2)$$

де X - матриця ознак, w - вектор ваг моделі, y - вектор цільових значень, $\|Xw - y\|_2^2$ - середньоквадратична похибка (MSE), $\|w\|_2^2$ - штраф за норму ваг моделі, α - коефіцієнт регуляризації. [5], [9]

Алгоритм виконання для L2-регуляризації:

1. Застосувати поліноміальні ознаки до навчальних і тестових даних для створення матриць X_{train} і X_{test}
2. Виконати стандартизацію даних для покращення стійкості моделі до масштабів.
3. Навчити модель Ridge-регресії, використовуючи регуляризацію з параметром α , що контролює величину штрафу.
4. Отримати прогнози на тестовій вибірці та обчислити середньоквадратичну похибку.

Мінімаксна апроксимація (L_∞ -норма). Ця модель мінімізує максимальну похибку:

$$\min_w \max_i |(Xw - y)_i|, \quad (3)$$

де $\max_i |(Xw - y)_i|$ - максимальна похибка серед усіх точок. [6]

Алгоритм виконання для мінімаксної апроксимації:

1. Використати бібліотеку CVXPY для формулювання задачі опуклої оптимізації:
 - o Визначити змінну w як вектор ваг.
 - o Задати функцію цілі: мінімізувати максимальну абсолютну похибку.
2. Розв'язати задачу оптимізації за допомогою ітеративного методу, обираючи точність та кількість ітерацій.
3. Застосувати знайдені коефіцієнти w для прогнозування значень тестової вибірки.
4. Обчислити середньоквадратичну похибку для оцінки якості моделі.

Для порівняння даних моделей було здійснено тестування. Для тестування було розроблено та імплементовано код за допомогою мови програмування Python [7] із використанням нижче зазначених бібліотек:

- NumPy для роботи з масивами та математичними операціями.
- Matplotlib для побудови графіків і візуалізації результатів.
- scikit-learn для реалізації моделей поліноміальної регресії та L2-регуляризації (Ridge).
- CVXPY для розв'язання оптимізаційної задачі мінімаксної апроксимації.

АЛГОРИТМ ПРОГРАМИ

1. Генерація даних

Алгоритм створює навчальну та тестову вибірки для моделювання залежності подвійного спуску.

- 1) Використовуються випадкові значення $x \in [0, 1]$, для яких цільова залежність задається як $y = \sin(2\pi x) + \varepsilon$, де ε — нормальний шум із нульовим середнім і дисперсією σ^2 .
- 2) У навчальну вибірку додаються аномалії, які становлять певний відсоток від загальної кількості даних. Аномальні точки формуються шляхом додавання випадкових зсувів із діапазону $[-15, -5] \cup [5, 15]$ до значень y .
- 3) Тестова вибірка створюється як рівномірний розподіл точок у діапазоні $x \in [0, 1]$ без додавання шуму.

2. Навчання моделей

Кожна модель тренується на поліноміальних ознаках різного ступеня (від 1 до заданого максимуму).

- 1) Поліноміальні ознаки: Для кожного ступеня полінома генерується матриця ознак X_{poly} за допомогою PolynomialFeatures.
- 2) Масштабування: Дані стандартизуються для забезпечення стабільності моделі під час навчання.
- 3) Методи регресії:
 - Без регуляризації: Використовується псевдообернення матриці для знаходження ваг w .
 - L2-регуляризація: Використовується Ridge, який додає штраф за велику норму ваг.
 - Мінімаксна апроксимація: Розв'язується оптимізаційна задача з мінімізацією максимальної абсолютної похибки, формулюється у вигляді опуклого завдання через cvxpy.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

3. Оцінка моделей

- 1) Для кожного ступеня полінома розраховується середньоквадратична похибка (MSE) на тестовій вибірці.
- 2) Результати зберігаються для подальшого аналізу.

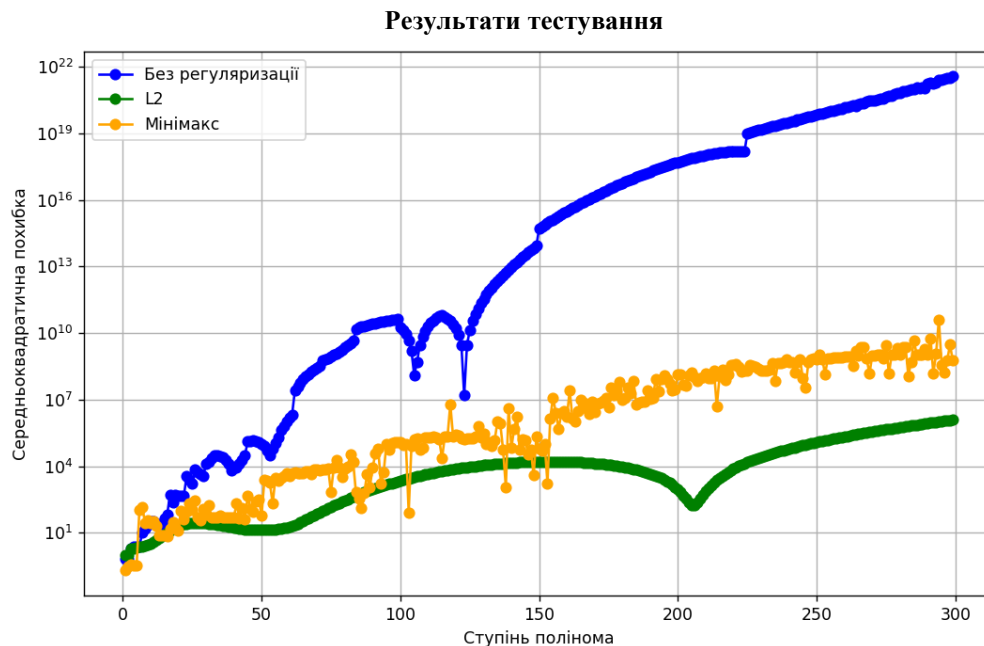


Рисунок 1 – Порівняння без регуляризації, L2 і мінімаксної апроксимації

Для моделі без регуляризації (синя лінія на графіку рис.1) спостерігається переважно зростаюча похибка із короткими локальними спадами на певних діапазонах ступенів. Це свідчить про те, що модель не досягає стадії, де похибка суттєво знижується на високих ступенях, як це характерно для подвійного спуску. Отже феномен подвійного спуску не проявляється повною мірою, як це описано в теоретичній моделі. Замість цього відбувається домінантне експоненційне зростання похибки. Така поведінка може бути пов'язана з тим, що модель без регуляризації чутливо реагує на аномалії та шум у даних, що посилюється зі збільшенням складності.

L2-регуляризація (зелена лінія на рис.1) демонструє стабільну похибку, яка поступово збільшується з ростом складності моделі. Вона не має експоненційного зростання, як у моделі без регуляризації, і показує найкращі результати на високих ступенях (200+), що відповідає її здатності справлятися з перенавчанням.

Мінімаксна апроксимація (помаранчева лінія на рис. 1) має схожу поведінку із L2-регуляризацією, але демонструє дещо гірші результати на високих ступенях. Проте, на низьких ступенях (до 50) вона є кращою за L2-регуляризацію завдяки своїй стійкості до аномальних точок.

Дані щодо зменшення середньоквадратичної похибки для різних підходів (L2-регуляризація та мінімаксна апроксимація) були проаналізовані в таблиці (Додаток 1).

З огляду на тестування, результати якого відображені на рис. 1, можна дійти висновків, що на низьких ступенях полінома (1–10) мінімаксна апроксимація демонструє перевагу, забезпечуючи суттєве зниження середньоквадратичної похибки. На середніх ступенях полінома (10–50) L2-регуляризація починає працювати стабільніше та ефективніше. Обидва методи регуляризації (L2 та мінімакс) забезпечують майже однакове зменшення похибки, проте L2-регуляризація демонструє трохи вищу стабільність на дуже високих ступенях.

Для подальшого дослідження ефективності методів регуляризації було проведено додаткові тестування із різними рівнями аномалій та шуму.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

1. Порівняльний аналіз для різних рівнів аномалій

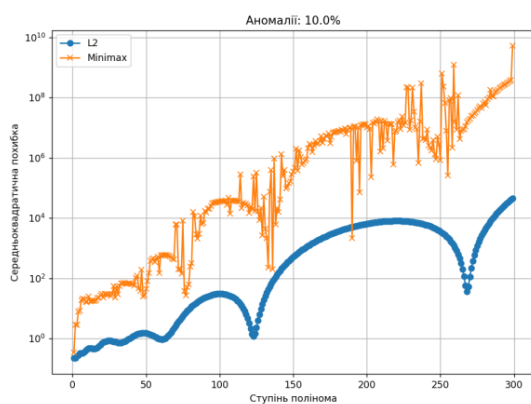


Рисунок 2

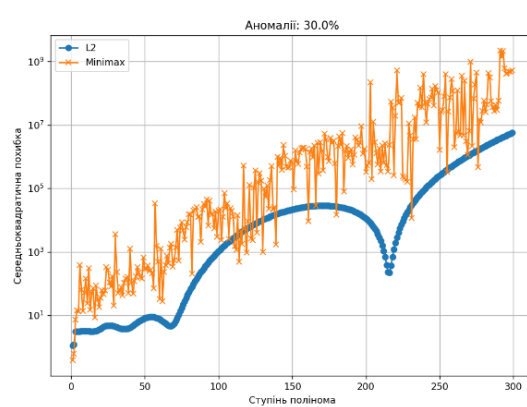


Рисунок 3

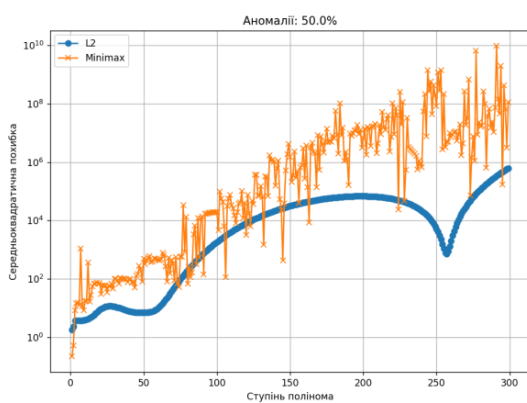


Рисунок 4

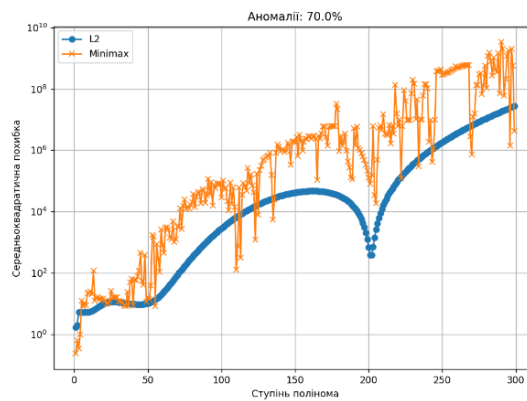


Рисунок 5

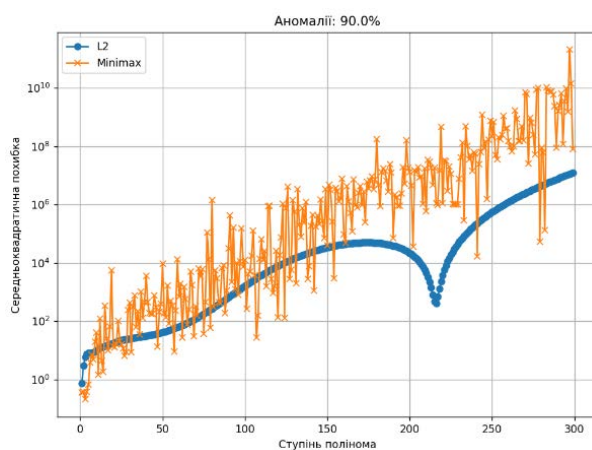


Рисунок 6 - Результати для частки аномалій. Порівняльний аналіз для різних рівнів аномалій

Було побудовано п'ять графіків (рис. 2-6), які демонструють результати для частки аномалій 10%, 30%, 50%, 70% та 90% відповідно. Це дало змогу проаналізувати, як збільшення кількості аномальних точок впливає на точність методів L2-регуляризації та мінімаксної апроксимації.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

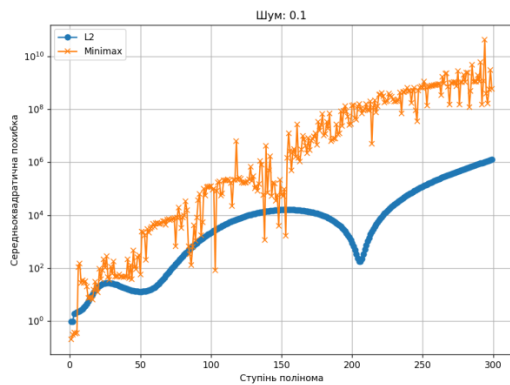


Рисунок 7

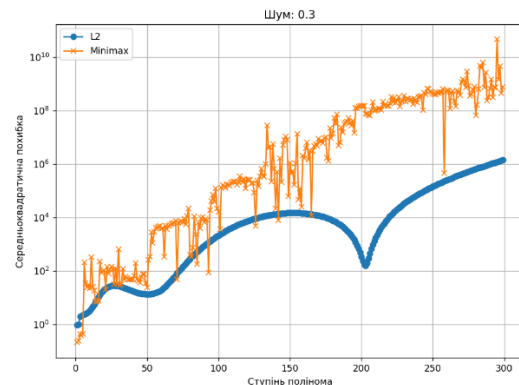


Рисунок 8

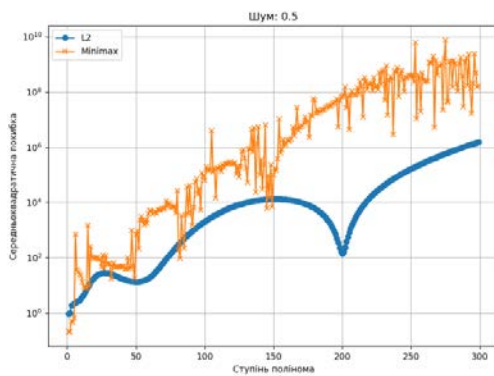


Рисунок 9

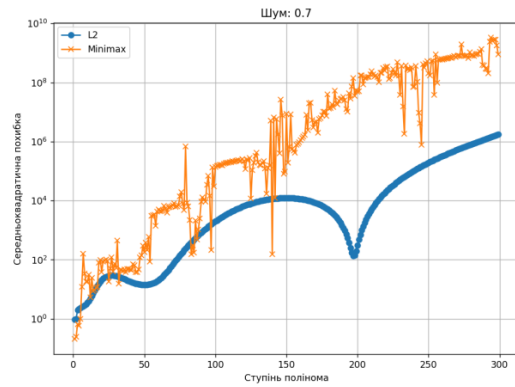


Рисунок 10

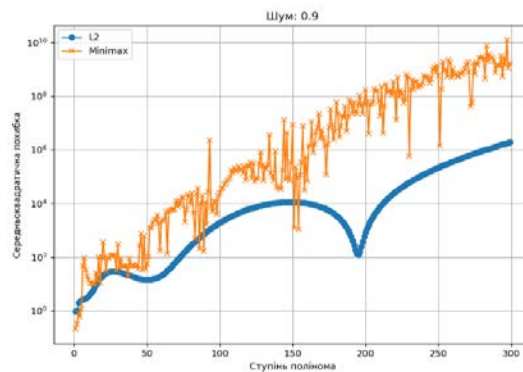


Рисунок 11- Результати впливу рівня шуму

На графіках видно, що мінімаксна апроксимація (помаранчева лінія) втрачає свою ефективність зі збільшенням рівня аномалій. При 10% аномалій вона демонструє низькі похибки на малих ступенях полінома, значно перевершуючи L2-регуляризцію. Зі збільшенням частки аномалій (30–50%) мінімаксна апроксимація поступово втрачає свою ефективність. Похибка на високих ступенях починає зростати, а результати стають менш стабільними. L2-регуляризація, натомість, демонструє стабільну похибку навіть за наявності 50% аномальних точок. На високому рівні аномалій (70–90%) мінімаксна апроксимація повністю втрачає свою ефективність на високих ступенях. Похибка росте експоненційно і стає нестабільною. L2-регуляризація зберігає стійкість до аномалій, демонструючи плавне зростання похибки зі збільшенням складності моделі. L2-регуляризація (синя лінія), навпаки, демонструє більш стійкі результати при будь-якому рівні аномалій. Її похибка повільно зростає зі збільшенням складності моделі, але вона залишається стабільною і не проявляє різких коливань, як у випадку мінімаксної апроксимації.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

1. Порівняльний аналіз для різних рівнів зашумленості

Для подальшого аналізу було зафіксовано частку аномалій на рівні 40%, де мінімаксна апроксимація показала помірну ефективність на попередніх етапах дослідження. Щоб дослідити вплив рівня шуму на точність обох методів, було побудовано п'ять графіків (Рис. 7–11) для значень шуму 0.1, 0.3, 0.5, 0.7 та 0.9. Це дозволило оцінити стійкість методів до додаткової варіативності даних.

Проведений аналіз показав, що L2-регуляризація є значно стійкішою до підвищеного рівня шуму у даних. Її похибка зростає поступово зі збільшенням шуму, але залишається стабільною навіть на високих ступенях полінома. Мінімаксна апроксимація, навпаки, демонструє високу чутливість до шуму: похибка швидко зростає, особливо на середніх і високих ступенях, і стає нестабільною з підвищенням варіативності даних. Таким чином, для задач із високим рівнем шуму L2-регуляризація є кращим вибором завдяки своїй здатності стабілізувати модель і контролювати перенавчання. Мінімаксна апроксимація може бути ефективною лише при низькому рівні шуму та на малих ступенях полінома.

ВИСНОВОК

Проведене мною дослідження продемонструвало вплив аномалій і шуму на феномен подвійного спуску та порівняло ефективність L2-регуляризації й мінімаксної апроксимації. Мінімаксна апроксимація показала високу ефективність на низьких та середніх ступенях полінома, особливо при невеликій кількості аномалій у даних. Її стійкість до аномальних точок дозволяє суттєво знижувати похибку на цих етапах, проте зі зростанням рівня аномалій її стабільність знижується, що призводить до різких коливань і експоненційного зростання похибки на високих ступенях.

Натомість L2-регуляризація продемонструвала стійку поведінку за різних умов, зокрема при високій кількості аномалій та шуму. Вона ефективно контролює перенавчання та забезпечує стабільне зростання похибки без різких коливань, що робить її кращим вибором для моделей високої складності.

Збільшення рівня шуму у даних показало, що обидва методи втрачають точність, але L2-регуляризація залишається стійкішою, у той час як мінімаксна апроксимація демонструє значні коливання.

Отже, отримані результати підтверджують, що ефективність методів залежить від характеру даних. Мінімаксна апроксимація є доцільною для задач із низьким рівнем аномалій та шуму, тоді як L2-регуляризація є більш ефективною для задач зі складними моделями, високим рівнем аномалій і шуму. Це підкреслює важливість адаптивного вибору методів регуляризації залежно від специфіки даних і завдання, що є ключовим для побудови стійких і точних моделей машинного навчання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Головач, А. Б. Математичні основи моделювання складних систем. Київ: Наукова думка, 2018. – с. 286
2. Н.В. Буреннікова, О.В. Зелінська, І.М. Ушкаленко, Ю.Ю. Буренніков "Оптимізаційні методи та моделі" – Вінниця: ВНТУ, 2019. – 121 с.
3. Огірко О. І., Галайко Н. В. "Теорія ймовірностей та математична статистика: навчальний посібник". – Львів: Львівський державний університет внутрішніх справ, 2017. – 292 с.
4. Belkin, M., Hsu, D., Ma, S., & Mandal, S. Reconciling Modern Machine Learning and the Bias-Variance Trade-off. PNAS, 2019. – с. 23
5. Ng, A. Y. Feature Selection, L1 vs. L2 Regularization, and Rotational Invariance. Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning, 2004. – с. 8
6. Boyd, S., & Vandenberghe, L. Convex Optimization. Cambridge University Press, 2004. – с. 732
7. Chen, T., & Guestrin, C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. KDD, 2016. – с. 785–790
8. Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006. – с. 738

REFERENCES

1. Golovach, A. B. Mathematical foundations of modeling complex systems. Kyiv: Naukova Dumka, 2018. – p. 286
2. N.V. Burennikova, O.V. Zelinska, I.M. Ushkalenko, Y.Yu. Burennikov "Optimization methods and models" – Vinnytsia: VNTU, 2019. – 121 p.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

3. Ogirko O. I., Galayko N. V. "Probability theory and mathematical statistics: a textbook". – Lviv: Lviv State University of Internal Affairs, 2017. – 292 p.
4. Belkin, M., Hsu, D., Ma, S., & Mandal, S. Reconciling Modern Machine Learning and the Bias-Variance Trade-off. PNAS, 2019. – p. 23
5. Ng, A. Y. Feature Selection, L1 vs. L2 Regularization, and Rotational Invariance. Proceedings of the 21st International Conference on Machine Learning, 2004. - p. 8
6. Boyd, S., & Vandenberghe, L. Convex Optimization. Cambridge University Press, 2004. - p. 732
7. Chen, T., & Guestrin, C. XGBoost: A Scalable Tree Boosting System. KDD, 2016. - p. 785–790
8. Bishop, C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. Springer, 2006. - p. 738

Надійшла до редакції 17.05.25 р.

КРИВОШЕЯ МИХАЙЛО ІГОРОВИЧ — аспірант кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Вінниця. **e-mail:** mishakryvoshea@gmail.com

MYKHAILO KRYVOSHEIA

STUDY OF THE DOUBLE TRIGGER PHENOMENON AND COMPARISON OF MINIMAX APPROXIMATION WITH L2-REGULARIZATION

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК 004.8

Т.Б. МАРТИНЮК, Д.О. КАТАШИНСЬКИЙ

ОСОБЛИВОСТІ АСОЦІАТИВНОГО ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Вінницький національний технічний університет,

вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021, e-mail: katashinskydmitry@gmail.com

Анотація. Асоціативні операції представляють собою обчислювальні масово-паралельні процедури над значними масивами даних. Саме цим пояснюється їх широке застосування у таких прикладних областях, як системи управління базами даних (СУБД), пошук і сортування IP-адрес в комп'ютерних мережах, а також ранжування даних, наприклад, у підсистемах прийняття рішень у складі інтелектуальних систем, зокрема, для медичного діагностування. Це пов'язано, не в останню чергу, з тим, що до складу асоціативних операцій входять вибірка за зовнішнім ключем, пошук даних за аналогією, сортування і ранжування елементів масиву даних. В даній роботі наведено результати аналізу особливостей застосування методів асоціативного оброблення даних для вирішення задач в інтелектуальних системах. Розглянуто означення інтелектуальної пам'яті як такої, що розширена за рахунок функціональних можливостей асоціативної пам'яті, тобто пам'яті з адресацією за змістом. В цьому випадку асоціативне оброблення даних містить не тільки пошук за асоціацією, тобто за зовнішнім ключем, але й пошук екстремального (максимального/мінімального) елемента у числовому масиві. Ще одним прикладом застосування асоціативного оброблення даних є різновиди нейромереж, які виконують функції авто- та гетероасоціативної пам'яті. Особливо актуальним у теперішній час є використання нейромереж в інтелектуальних системах керування мобільних роботів, оскільки їх структура забезпечується асоціативними рівнями оброблення. Ще одним затребуваним підходом є використання класифікатора з розширеними функціональними можливостями у складі підсистем підтримки прийняття рішень для експертних систем різного призначення. Ці приклади свідчать про конкретний зв'язок методів асоціативного оброблення даних і впровадження нейротехнологій у створення інтелектуальних систем різного призначення.

Ключові слова: асоціативне оброблення, асоціативна пам'ять, розпізнавання образів, інтелектуальна система, сортування, ранжування.

Abstract. Associative operations are computational massively parallel procedures over large data sets. This explains their widespread use in such application areas as database management systems (DBMS), searching and sorting IP addresses in computer networks, and ranking data, for example, in decision-making subsystems as part of intelligent systems, in particular, for medical diagnostics. This is due, not least, to the fact that associative operations include selection by foreign key, searching for data by analogy, sorting and ranking of elements of a data set. This paper presents the results of an analysis of the features of the application of associative data processing methods for solving problems in intelligent systems. The definition of intelligent memory is considered as one that is expanded due to the functional capabilities of associative memory, i.e. memory with content-addressing. In this case, associative data processing includes not only a search by association, that is, by a foreign key, but also a search for an extreme (maximum/minimum) element in a numerical array. Another example of the application of associative data processing are varieties of neural networks that perform the functions of auto- and heteroassociative memory. The use of neural networks in intelligent control systems of mobile robots is especially relevant today, since their structure is provided by associative processing levels. Another popular approach is the use of a classifier with extended functional capabilities as part of decision support subsystems for expert systems for various purposes. These examples indicate a specific connection between associative data processing methods and the implementation of neurotechnologies in the creation of intelligent systems for various purposes.

Keywords: associative processing, associative memory, pattern recognition, intelligent system, sorting, ranking.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-44-52

© Т.Б. МАРТИНЮК, Д.О. КАТАШИНСЬКИЙ, 2025

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ВСТУП

Очевидним є зв'язок асоціативного оброблення даних, яке містить такі необчислювальні операції, як вибірка за ключем, пошук за аналогією, сортування, а також ранжування елементів масиву даних [1,2] з технологіями штучного інтелекту [3-6]. При цьому, необхідність подальшого розвитку асоціативних принципів оброблення даних пов'язано, не в останню чергу, з використанням автоматизованих систем збереження та паралельного оброблення значних масивів даних за їх символічними іменами або за їх змістом, тобто за так званими «асоціаціями» [7,8]. Тому областями широкого застосування асоціативного оброблення даних є, зокрема, системи управління базами даних (СУБД), пошук і сортування IP-адреси у комп'ютерних мережах і підсистеми підтримки прийняття рішень в інтелектуальних системах [9-11].

В обчислювальній техніці асоціативне оброблення виконується у більшості випадків над елементами числового масиву [2]. Разом з тим, такі асоціативно-логічні операції як сортування і ранжування [1,2,12] активно використовуються в нейротехнологіях, зокрема, при побудові окремих типів нейромереж [4,5,13]. Наприклад, у нейромережних класифікаторах відому процедуру “1 з N” для реалізації конкуренції у шарах нейромереж можна виконати не тільки із застосуванням структур нейромереж типу MAXNET [6], але й в процесі сортування векторного (лінійного) масиву чисел з визначенням максимального елемента [9,14].

Крім того, разом з широко використовуваним програмним забезпеченням певну зацікавленість викликають апаратні методи реалізації асоціативного оброблення даних [15], оскільки асоціативні операції задіяно в інтелектуальних системах різного призначення [16,17].

МЕТА

Метою роботи є аналіз особливостей застосування методів асоціативного оброблення даних для вирішення задач в інтелектуальних системах.

1. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ПАМ'ЯТЬ ТА АСОЦІАТИВНЕ ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ

Особливістю пам'яті людини є її асоціативний характер, що містить такі властивості [7]:

- пошук інформації базується на мірі схожості із ключовим образом;
- образи зберігаються як структуровані послідовності;
- вибірка інформації представляє собою динамічний процес.

Крім того, одне із узагальнених понять “асоціації” містить таке пояснення: це явище, коли одне представлення викликає інше за схожістю, суміжністю або протилежністю [7]. В обчислювальній техніці, до речі, вважається що поняття “асоціативний” відображає лише факт наявності взаємозв'язків між даними і не має відношення до механізму збереження інформації у пам'яті [7]. Таким чином позначається розмежування понять “асоціативне оброблення” і “асоціативна пам'ять”.

Останнє поняття відноситься до так званої “пам'яті з адресацією за змістом”. Отже, асоціативне оброблення числової інформації, в першу чергу, передбачає пошук за асоціацією, тобто за зовнішнім ключем [1,7]. Але, разом з тим, може виконуватись оброблення даних без зовнішньої ключової інформації, зокрема, при пошуку максимального або мінімального числа, тобто як результат сортування даних. Крім того, існує такий варіант пошуку, коли серед деякої сукупності даних необхідно знайти такі, що найкраще відповідають ключовому зразку. У цьому випадку асоціативна вибірка відповідає певним чином процесу розпізнавання образів [3-6].

Отже, введення у перелік виконуваних асоціативно-логічних операцій інших, які не пов'язані з вибіркою за змістом, розширює функціональні можливості асоціативної пам'яті, що робить доречним позначення її як інтелектуальної пам'яті. До додаткових операцій такої пам'яті можна віднести такі розповсюджені масово-паралельні операції над елементами векторів, як визначення мінімального або максимального елемента та середнього k чисел [18].

2. НЕЙРОМЕРЕЖНА АСОЦІАТИВНА ПАМ'ЯТЬ

Серед відомих класичних структур нейромереж, які виконують функції асоціативної пам'яті, необхідно відмітити, в першу чергу, мережу Хопфілда, мережу Хеммінга і мережу ВАР – двоспрямовану асоціативну пам'ять [4-6]. Базовими функціями такої пам'яті є запам'ятовування, відтворення та забування образів, на яких вона навчалась [19]. При цьому треба розрізняти автоасоціативну пам'ять у вигляді мережі Хопфілда і мережі ВАР [5,6], на відміну від

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

гетероасоціативної пам'яті у вигляді мережі Хеммінга [4,5], тобто мережа з функцією класифікації образів (рис1).



Рисунок 1 - Моделі нейромережної асоціативної пам'яті.

В даному випадку доцільно показати взаємозв'язок між асоціативною вибіркою у розподіленій асоціативній пам'яті і процесом розпізнавання образів у нейромережах. Об'єднуючим їх фактором є здатність як асоціативної пам'яті, так і нейромереж до селективної видачі інформації у відповідь на вхідні образи, які в даному випадку розглядаються як аргументи пошуку [7]. Цей взаємозв'язок підтверджують базові математичні залежності процесів, що відбуваються у двох способах асоціативного оброблення даних, що розглядаються.

Для асоціативної вибірки у відповідній пам'яті характерним є векторно-матричне множення у вигляді [7]:

$$Y = M \cdot X = \sum \gamma_k \cdot Y_k, \quad (1)$$

де X - вхідний образ (вектор) як функція пошукового аргументу; M - матриця, що визначає структуру асоціативної пам'яті; Y - вихідний образ (вектор) як деякий "спогад" у пам'яті M ; γ_k - коефіцієнт лінійної регресії X на множині $\{X_k\}$.

Для нейромереж як моделей асоціативної пам'яті також можна використовувати векторно-матричне множення, щоб показати асоціацію між ключовими векторами X_k і запам'ятовуваним вектором Y_k у вигляді [6]:

$$Y_k = W_k \cdot X_k, \quad k = 1, \dots, 9, \quad (2)$$

де W - вагова матриця, яка визначається навчальними парами (X_k, Y_k) .

В результаті суми матриць вагових коефіцієнтів всього набору асоціацій можна розглядати як матрицю "пам'яті", а саме, як "досвід", отриманий при навчанні нейромереж [6], тобто встановити таке співвідношення:

$$M = \sum_{k=1}^9 W_k. \quad (3)$$

При цьому, необхідно додати, що разом з тим особливий інтерес для нейромереж представляє використання такої асоціативно-логічної операції, як сортування елементів векторного лінійного масиву чисел при реалізації процедури "1 з N". У більшості випадків вона реалізується у нейромережних класифікаторах як механізм конкуренції нейронів через їх від'ємні латеральні зв'язки у конкурентному

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

шарі нейромереж [4-6]. При цьому заміна цієї процедури, наприклад, на один з перспективних методів сортування на базі швидкісних операцій інкремента/декремента дозволить не тільки прискорити процес сортування, але й розширити функціональні можливості класифікатора за рахунок ранжування результатів [20].

3. АСОЦІАТИВНІ РІВНІ ОБРОБЛЕННЯ ДАНИХ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Одним з найбільш наочних прикладів ефективного застосування асоціативного оброблення даних є інтелектуальні системи керування у робототехніці [21, 22]. Для таких систем керування доцільним є забезпечення таких базових умов [23, 24]:

- апаратна підтримка процедур керування;
- відстеження та класифікація (розпізнавання) поточного стану у реальному часі;
- прийняття рішення у реальному часі.

В результаті за таких умов найбільш прийнятним є використання нейромережних методів [21, 23]. Саме для оброблення сенсорної інформації використовуються такі процедури, як пошук асоціацій між образами, ситуаціями та їх позначеннями, що у певній мірі відповідає інтелектуалізації керування мобільними роботами [21,23,24]. При цьому необхідно відмітити, що для створення інтелектуальних систем керування роботами активно впроваджуються нейронні елементи та їх базові складові на новітніх технологіях [25-27].

Ще одним наочним прикладом використання як нейротехнологій, так і асоціативних операцій можна розглядати принципи функціонування класифікаторів об'єктів [13, 17], які, як правило, задіяні у підсистемах підтримки прийняття рішень [10-12, 28]. Особливо це актуально для процесу медичного діагностування [29,30]. На рис.2 схематично показано, як задіяно методи асоціативного оброблення даних в процесі медичного діагностування.

Для цього випадку як приклад можна навести класичну модель класифікації за лінійними дискримінантними функціями (ЛДФ) у вигляді таких базових співвідношень [29,31,32]:

$$g_i(X) = \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot x_j - w_{io} \cdot x_o, i = \underline{1, m} \quad (4)$$

$$X \in C_k \Leftrightarrow k = \operatorname{argmax}\{g_i(X)\}, k = \underline{1, m} \quad (5)$$

де x_j - j -й елемент n -вимірному вхідного вектора ознак X ; w_{ij} - ваговий коефіцієнт j -го входу i -ої ЛДФ $g_i(X)$; $w_{io} \cdot x_{io}$ - вільний елемент i -ої ЛДФ $g_i(X)$; $C = \{C_1, \dots, C_k\}$ - множина класів; m - кількість класів, w - матриця вагових коефіцієнтів w_{ij} , $w_{io} x_o$ - вільний елемент.

Формувач ЛДФ у структурі класифікатора реалізує функцію (4) в процесі векторно-матричного множення, а максимізатор типу "1 з N" - функцію (5), тобто визначає k -й клас з позначенням виходу y_k за максимальною величиною k -ої ЛДФ $g_k(X)$ серед сформованих m ЛДФ.

Найбільш перспективним з точки зору вдосконалення структурного та функціонального базису класифікатора (рис.3) є максимізатор. Якщо розглядати нейромережний варіант такої структури класифікатора, то функцію формувача ЛДФ може виконувати одношаровий персептрон, а функцію максимізатора - деякі мережі типу MAXNET [4,6], серед яких або нейромережа з від'ємними латеральними зв'язками у нейронів конкурентного шару, або нейромережа зі структурою Feed-Forward MAXNET.

Разом з тим, як для нейромережного, так і для класичного варіантів структури класифікатора одним із способів реалізації функції максимізатора можна задіяти асоціативну операцію сортування одновимірному (векторного) масиву чисел, оскільки в результаті можна визначити максимальний за значенням елемент числового масиву [20].

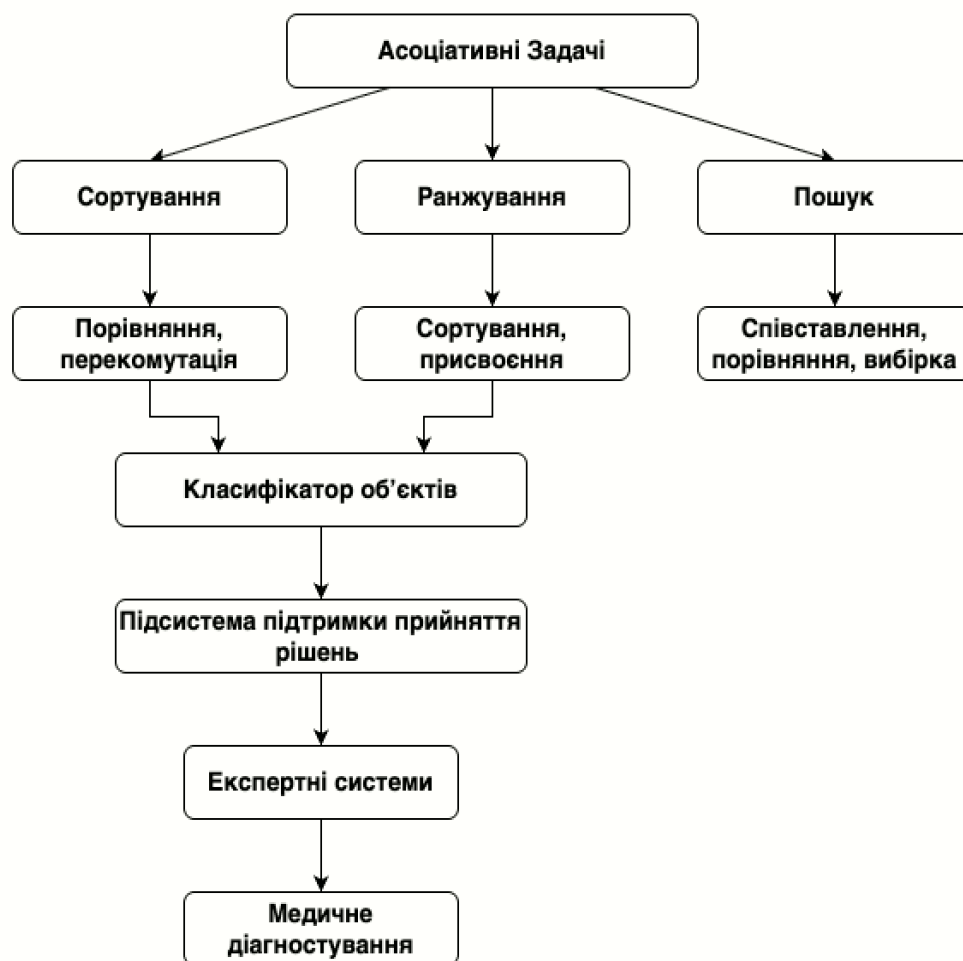


Рисунок 2 – Асоціативні аспекти оброблення даних для медичного діагностування

В результаті базова структура класифікатора об'єктів має вигляд як на рис.3



Рисунок 3 – Базова структура класифікатора об'єктів

За апаратними та часовими витратами в цьому плані інтерес представляє альтернативний метод сортування з використанням швидкісної операції декременту [20]. Це пов'язано з тим, що, по-перше,

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

операція декремента за цим методом виконується в кожному циклі оброблених паралельно для всіх елементів числового масиву до моменту обнулення одного з них. По-друге, цей момент обнулення в подальшому можна використати для формування рангів відповідних елементів із задіянням операції інкремента, починаючи з фіксації рангу "1" для найменшого за значенням елемента масиву [17,20].

По-третє, функції класифікатора в цьому випадку розширюються за рахунок можливості формування рангів для ЛДФ, а отже, і для результатів класифікації, що знаходить широке застосування в процесі прийняття рішень в експертних системах різного призначення. У четверте, застосування парних операцій декремента/інкремента дозволяє їх реалізацію на реверсивних лічильниках [33], що, у свою чергу, підвищує регулярність структури як сортувальника для максимізатора, так і ранжувальника, введеного з метою ранжування результатів класифікації до складу класифікатора [20].

4. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Аналіз найбільш розповсюджених застосувань асоціативних методів оброблення даних, а саме, для інтелектуальних систем керування у робототехніці та для класифікаторів у складі підсистем підтримки прийняття рішень, показав перспективність їх удосконалення та ефективного практичного задіяння.

Як приклад, новий альтернативний метод сортування, зокрема, на базі сумісного використання швидкісних операцій декремента/інкремента забезпечує не тільки прискорення асоціативної операції вибірки максимального числа типу "1 з N", але й розширення функціональних можливостей засобів, що їх використовують, за рахунок реалізації одночасного ранжування результатів.

Крім того, апаратна реалізація одночасно операцій декремента/інкремента в єдиному обчислювальному процесі забезпечує збільшення регулярності структури відповідних комп'ютерних засобів для інтелектуальних систем різного призначення.

ВИСНОВКИ

1. Існує реальний зв'язок між методами асоціативного оброблення даних і впровадженням нейротехнологій у створення інтелектуальних систем різного призначення. Це стосується, наприклад, засобів у складі бортових систем мобільних роботів, а також підсистем підтримки прийняття рішень для експертних систем.
2. Порівняння математичного опису як процесу асоціативної вибірки даних у відповідній розподіленій пам'яті за змістом, так і процесу розпізнавання у нейромережах класичного типу свідчить про їх аналогічність, що пов'язано з наявністю властивості асоціативності у нейромережах.
3. Наявність асоціативних рівнів оброблення даних у засобах інтелектуальних систем підтверджує ефективність задіяння нейромережних технологій на таких прикладах, як керування динамічними системами у складних умовах, а також розпізнавання об'єктів з ранжуванням результатів класифікації.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. R. Sedgewick, Algorithms in C++: Part 1-4. Fundamentals, Data Structures, Sorting, Searching. 3rd ed.. Addison-Wesley, Longman, 1999.
2. J. D. Knuth, The Art of Computer Programming, V.3. Sorting and Searching, 2nd ed. Addison - Wesley Professional, 1998. 800 p.
3. M.T. Jones, AI Application Programming. Charles River Media, 2003.
4. S. Osowski, Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Poland: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013. 490 s.
5. R. Callan, The Essence of Neural Networks. Prentice Hall Europe, NY, 1999. 232c.
6. S. Haykin, Neural Networks and Learning Machines. Upper Saddle River, 2009.
7. T. Kohonen, Self-Organization and Associative Memory. Springer Berlin Heidelberg, 1989.
8. Е.М. Кукуль, Асоціативні нейроподібні структури. Київ, Україна: Наукова думка, 1990.
9. І.І. Цмоць, Інформаційні технології та спеціалізовані засоби обробки сигналів і зображень в реальному часі. Львів, Україна: Видавництво УАД, 2005. 228 с.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

10. В. Вуйцік, О.З. Готра, та В.В. Григор'єв, Експертні системи. Львів, Україна: Ліга-Прес, 2006. 209 с.
11. Р.Ф. Ситник, Системи прийняття рішень. Київ, Україна: КНЕУ, 2004. 614 с.
12. Г. М. Гнатієнко, та В.Є. Снитюк, Експертні технології прийняття рішень. Київ, Україна: ТОВ "Маклаут", 2008.
13. T. Martynuk, B. Krupikivskyi, L. Kupenshtein, and V. Lukichov, "Neural network models of heteroassociative memory for the classification tasks", *Radioelectronics and Computer Systems*, №1 (102), с. 104-111. 2022. doi:10.32620/reks.2022.2.09.
14. Т. Б. Мартинюк, А. В. Кожем'яко, Л. М. Куперштейн, та О. С. Безкрєвний, "Операційно-елементний базис для інтелектуальних систем", *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, №6, с. 197-201. 2019.
15. І.Г. Цмоць, В.М. Теслюк, Ю.В. Опотяк, Р.В. Парцей, та Р.В. Зінько, "Базова архітектура мобільної робототехнічної платформи з інтелектуальною системою управління рухом і захистом передачі даних", *Український журнал інформаційних технологій*, №2, Т.3, с. 74-80. 2021. <https://doi.org/10.23939/ujit2021.02.074>
16. О.Д. Азаров, Т.Б. Мартинюк, А.В. Кожем'яко, Теоретичні та реалізаційні моделі комп'ютерних інтелектуальних систем. Монографія. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2024. 130с.
17. Т.Б. Мартинюк, Б.І. Круківський та О.А. М'якішев, "Особливості моделей нейроподібного класифікатора для розпізнавання об'єктів", *Вісник Вінницького національного політехнічного інституту*, №4(163), с. 53-63. 2022.
18. D. Smith, J. Hall and K. Miyke, "The CAM 2000 Chip Architecture". Rutgers University. [Електронний ресурс], Режим доступу. <https://www.rutgers.edu/pub/technical-reports>.
19. N.F. Kirichenko, A.M. Reznik, & S.P. Shchetenyuk, "Matrix pseudoinversion in the Problem of Design of Associative Memory", *Sybernetic and Systems Analysis*, №33, pp. 308-316. 2001.
20. Т.Б. Мартинюк, та Б.І. Круківський, "Модель паралельного сортувальника для асоціативного процесора", *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, №5, с. 49-55.2020.
21. А.С. Васюра, Т.Б.Мартинюк, та Л.М. Куперштейн, *Методи та засоби нейроподібної обробки даних для систем керування*. Монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ - Вінниця, 2008. 175с.
22. P. Corke, *Robotic, Vision and Control*. Springer International Publishing. 2017.
23. Arents, & M. Greitans, "Smart industrial Robot Control Trends, Challenges and Opportunities within Manufacturing", *Applies Sciences*, vol.12, issue 2.p.937. 2022.
24. Y. Pategera, "Main strategy for autonomous robotic controller design", *Радіоелектроніка та інформатика*, вип. 4,с. 35-41. 2011.
25. В.Ф. Бордаченко, О.К. Колесницький, та С.А. Василецький, Таймерні нейронні елементи та структури. Монографія. Вінниця, Україна: УНІВЕРСУМ - Вінниця, 2004. 126с.
26. Т.Б. Мартинюк, А.В. Кожем'яко, Н.В. Фофанова, та О.М. Наконечний, "Адаптивний суматор для системи керування роботом", *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, №2(10), с. 96-104. 2005.
27. V.I. Osinsky, "Information conception of image perceptron at solid-state lighting", *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, V.10, №3, p.30-43.2007.
28. О.В. Нестеренко, Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень. Навч. посібник. Київ, Україна: Нац. акад. управління, 2016.
29. О.Г. Аврунін, Є.В. Бодяньський, М.В. Калашник, В.В. Семенець, та В.О. Філатов, *Сучасні інтелектуальні технології медичної діагностики*. Харків, Україна: ХНУРЕ, 2018.
30. Rangaraj M.Rangayyan, *Biomedical Signal Analysis*. John Wiley & Sons, 2015.
31. J. Brownlee, "Linear Discriminant Analysis for Machine Learning". Available at: <https://machinelearningmastery.com/linear-discriminant-analysis-for-learning>
32. T.B. Martyniuk, L.M. Kupershtein, A.V. Medvid, A.V. Kozhemiako, and others, "Application of Discriminants Analysis Methods in Medical Diagnostics", *Optical Fibers and Their Applications, Proc. of SPIE* 8698, 86980, 2012.
33. С.О. Кравчук, та В.О. Шонін, *Основи комп'ютерної політехніки*. Навч. посібник Київ, Україна: ІВЦ "Видавництво Політехніка", 2002. 344с.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

REFERENCES

1. R. Sedgewick, Algorithms in C++: Parts 1-4. Fundamentals, Data Structures, Sorting, Searching. 3rd ed.. Addison-Wesley, Longman, 1999.
2. J.D. Knuth, The Art of Computer Programming, V.3. Sorting and Searching, 2nd ed. Addison - Wesley Professional, 1998. 800 p.
3. M.T. Jones, AI Application Programming. Charles River Media, 2003.
4. S. Osowski, Sieci neuronowe do przetwarzania informacji. Poland: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2013. 490 p.
5. R. Callan, The Essence of Neural Networks. Prentice Hall Europe, NY, 1999. 232p.
6. S. Haykin, Neural Networks and Learning Machines. Upper Saddle River, 2009.
7. T. Kohonen, Self-Organization and Associative Memory. Springer Berlin Heidelberg, 1989.
8. E.M. Kussul, Associative Neuro-Like Structures. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka, 1990.
9. I.I. Tsmots, Information Technologies and Specialized Means of Signal and Image Processing in Real Time. Lviv, Ukraine: UAD Publishing House, 2005. 228 p.
10. V. Vuytsik, O.Z. Gotra, and V.V. Grigoriev, Expert Systems. Lviv, Ukraine: Liga-Press, 2006. 209 p.
11. R.F. Sytnyk, Decision-Making Systems. Kyiv, Ukraine: KNEU, 2004. 614 p.
12. G.M. Gnatienco, and V.E. Snytyuk, Expert Decision-Making Technologies. Kyiv, Ukraine: Maklout LLC, 2008.
13. T. Martyniuk, B. Krupikivskyi, L. Kupenshtein, and V. Lukichov, "Neural network models of heteroassociative memory for the classification tasks", Radioelectronics and Computer Systems, №1 (102), pp. 104-111. 2022. doi:10.32620/reks.2022.2.09.
14. T. B. Martyniuk, A. V. Kozhem'yako, L. M. Kupershtein, and O. S. Bezkrivnyi, "Operational-elementary basis for intelligent systems", Bulletin of Khmelnytsky National University. Technical Sciences, №6, pp. 197-201. 2019.
15. I.G. Tsmots, V.M. Teslyuk, Yu.V. Optyak, R.V. Partsey, and R.V. Zinko, "Basic architecture of a mobile robotic platform with an intelligent motion control system and data transmission protection", Ukrainian Journal of Information Technologies, No. 2, Vol. 3, pp. 74-80. 2021. <https://doi.org/10.23939/ujit2021.02.074>
16. O.D. Azarov, T.B. Martyniuk, A.V. Kozhem'yako, Theoretical and implementation models of computer intelligent systems. Monograph. Vinnytsia, Ukraine: VNTU, 2024. 130p.
17. T.B. Martyniuk, B.I. Krukivskyi and O.A. Myakishev, "Features of models of a neural-like classifier for object recognition", Bulletin of the Vinnytsia National Polytechnic Institute, No. 4(163), p. 53-63. 2022.
18. D. Smith, J. Hall and K. Miyke, "The CAM 2000 Chip Architecture". Rutgers University. [Electronic resource], Access mode. <https://www.rutgers.edu/pub/technical-reports>.
19. N.F. Kirichenko, A.M. Reznik, & S.P. Shcheteniyuk, "Matrix pseudoinversion in the Problem of Design of Associative Memory", Cybernetic and Systems Analysis, №33, pp. 308-316. 2001.
20. T.B. Martyniuk, and B.I. Krukivskyi, "Model of a parallel sorter for an associative processor", Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute, №5, pp. 49-55.2020.
21. A.S. Vasyura, T.B. Martyniuk, and L.M. Kupershtein, Methods and tools for neural-like data processing for control systems. Monograph. Vinnytsia, Ukraine: UNIVERSUM - Vinnytsia, 2008. 175p.
22. P. Corke, Robotic, Vision and Control. Springer International Publishing, 2017.
23. Arents, & M. Greitans, "Smart industrial Robot Control Trends, Challenges and Opportunities within Manufacturing", Applies Sciences, vol.12, issue 2.p.937. 2022.
24. Y. Pategera, "Main strategy for autonomous robotic controller design", Radioelectronics and Informatics, vol. 4, pp. 35-41. 2011.
25. V.F. Bordachenko, O.K. Kolesnitsky, and S.A. Vasyletsy, Timer neural elements and structures. Monograph. Vinnytsia, Ukraine: UNIVERSUM - Vinnytsia, 2004. 126p.
26. T.B. Martyniuk, A.V. Kozhem'yako, N.V. Fofanova, and O.M. Nakonechny, "Adaptive adder for a robot control system", Optoelectronic Information and Energy Technologies, No. 2(10), pp. 96-104. 2005.
27. V.I. Osinsky, "Information conception of image perceptron at solid-state lighting", Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics, V.10, No. 3, p.30-43.2007.
28. O.V. Nesterenko, Intelligent decision support systems. Textbook. Kyiv, Ukrainka: National Academy of Management, 2016.
29. O.G. Avrunin, E.V. Bodyansky, M.V. Kalashnyk, V.V. Semenets, and V.O. Filatov, Modern intelligent technologies of medical diagnostics. Kharkiv, Ukraine: KhNURE, 2018.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

30. Rangaraj M. Rangayyan, Biomedical Signal Analysis. John Wiley & Sons, 2015.
31. J. Brownlee, "Linear Discriminant Analysis for Machine Learning". Available at: <https://machinelearningmastery.com/linear-discriminant-analysis-for-learning>
32. T.B. Martyniuk, L.M. Kupershtein, A.V. Medvid, A.V. Kozhemiako, and others, "Application of Discriminants Analysis Methods in Medical Diagnostics", Optical Fibers and Their Applications, Proc. of SPIE 8698, 86980, 2012.
33. S.O. Kravchuk, and V.O. Shonin, Fundamentals of Computer Polytechnics. Textbook Kyiv, Ukraine: IVC "Polytechnics Publishing House", 2002. 344p.

Надійшла до редакції 15.05.25 р.

МАРТИНЮК ТЕТЯНА БОРИСІВНА – доктор техн. наук, професор кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: martyniuk.t.b@gmail.com**
КАТАШИНСЬКИЙ ДМИТРО ОЛЕКСАНДРОВИЧ – аспірант кафедри обчислювальної техніки, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: katashinskydmitry@gmail.com**

T.B. MARTYNIUK, D.O. KATASHYNSKYI

PECULIARITIES OF ASSOCIATIVE DATA PROCESSING IN INTELLIGENT SYSTEMS

Vinnitsia National Technical University

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК 004.738.5

П.О. ЯКОВИШЕН, С.Є. ТУЖАНСЬКИЙ

АДАПТИВНИЙ МЕТОД ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ У ІНФОРМАЦІЙНИХ КАНАЛАХ ТЕЛЕМЕДИЧНИХ СИСТЕМ

*Вінницький національний технічний університет 21021, Хмельницьке шосе 95, м. Вінниця, Україна,
E-mail: yakovishen3@gmail.com, slavat@vntu.edu.ua*

Анотація: У роботі запропоновано адаптивний метод передавання даних у інформаційних каналах телемедичних систем, що передбачає динамічне коригування стиснення, оптимізацію маршрутизації та балансування навантаження. Для підтвердження ефективності методу проведено комп'ютерне моделювання, результати якого демонструють підвищення надійності передавання у складних мережевих умовах.

Запропонований підхід може підвищити якість функціонування інформаційних каналів телемедичних систем, зокрема для відеоконсультацій, дистанційного моніторингу пацієнтів і передавання діагностичних зображень у реальному часі.

Ключові слова: адаптивне передавання даних, телемедичні системи, інформаційний канал, оптимізація якості обслуговування (QoS).

Abstract: The paper proposes an adaptive data transmission method for information channels in telemedicine systems, which involves dynamic compression adjustment, routing optimization, and load balancing. To validate the effectiveness of the method, computer simulations were conducted, and the results demonstrate improved transmission reliability under challenging network conditions.

The proposed approach can enhance the performance of information channels in telemedicine systems, particularly for video consultations, remote patient monitoring, and real-time transmission of diagnostic images.

Keywords: adaptive data transmission, telemedicine systems, information channel, Quality of Service (QoS) optimization

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-53-63

ВСТУП

Розвиток інфокомунікаційних технологій відкриває нові можливості для телемедицини та інтернету медичних речей (IoMT), зокрема для віддаленого консультування, дистанційного моніторингу стану пацієнтів та оперативного обміну діагностичними даними. Однак ефективність застосування телемедичних систем значною мірою залежить від якості та стабільності передавання даних у відповідних інформаційних каналах [1]. Попередні дослідження, зокрема робота авторів [2], заклали основи для аналізу впливу мережевих умов на передавання медичних даних, що стало базою для подальшого розвитку адаптивних методів. Вимоги до сучасних каналів передачі діагностичної інформації, зокрема DICOM зображень, вимагають високої пропускної здатності каналів передавання (від 1 Гбіт/с) [3]. Мінливі характеристики мережевого середовища можуть призвести до втрати частини даних, що ускладнить або унеможливить постановку відповідного діагнозу.

Затримка сигналу, обмежена пропускна здатність та втрати пакетів негативно впливають на передачу даних, що є критично важливим для систем, працюючих в реальному часі. Однією з стратегій оптимізації для забезпечення надійності передавання є підхід з перерозподілом навантаження на канали зв'язку без втрат важливої діагностичної інформації.

Одним із ключових напрямів вирішення цієї проблеми є застосування алгоритмів стиснення медичних даних у поєднанні з адаптивним регулюванням параметрів передавання відповідно до змін у мережевому середовищі. Використання ефективних методів стиснення дає змогу зменшити розмір переданих файлів, що прискорює передачу інформації та мінімізує затримку.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Додаткове впровадження механізмів адаптивного керування трафіком дозволяє коригувати якість стиснення, буферизацію та механізми повторної передачі, враховуючи поточний стан мережі [4].

У статті проводиться аналіз сучасних підходів до стиснення медичних даних, оцінюється вплив нестабільного зв'язку на якість передавання та розробляється адаптивний метод, що забезпечує оптимальний баланс між швидкістю передачі та якістю інформації. Для підтвердження ефективності запропонованого методу проведено комп'ютерне моделювання, результати якого демонструють підвищення надійності передавання у складних мережевих умовах.

1. МЕТОДИ СТИСНЕННЯ МЕДИЧНИХ ДАНИХ

Передавання даних у телемедичних системах є складним процесом, що вимагає забезпечення високої швидкості, збереження якості інформації та мінімізації затримок. Діагностичні зображення та відеопотоки потребують значних обсягів пам'яті та пропускну здатності мережі, що створює значне навантаження на канали зв'язку. У зв'язку з цим застосування методів стиснення відіграє ключову роль у забезпеченні ефективного передавання даних [3].

Методи стиснення дозволяють скорочувати обсяги переданої інформації шляхом зменшення надлишкових даних та/або представлення їх у компактнішому форматі. Вибір алгоритму стиснення визначається типом медичних даних, вимогами до точності їх відновлення та умовами передавання. Основними підходами є стиснення з втратами, що дозволяє досягти суттєвого зменшення розміру файлів, та стиснення без втрат, яке забезпечує повне збереження вихідної інформації.

Стиснення з втратами. Методи стиснення з втратами спрямовані на значне скорочення обсягу переданих даних за рахунок видалення інформації, яка має мінімальний вплив на візуальне або функціональне сприйняття медичних зображень. Цей підхід використовується переважно для стиснення великих діагностичних зображень, таких як комп'ютерна томографія (КТ), магнітно-резонансна томографія (МРТ) та рентгенівські знімки, де можна допустити мінімальні втрати якості без критичних наслідків для діагностики.

Одним із найпопулярніших методів у медицині є JPEG 2000, який використовує дискретне вейвлет-перетворення для покращеного стиснення зображень. На відміну від класичного алгоритму JPEG, що працює на основі дискретного косинусного перетворення, JPEG 2000 забезпечує гнучку компресію та дає змогу регулювати ступінь стиснення, зберігаючи при цьому важливі діагностичні деталі.

Ще одним ефективним методом є SPIHT (Set Partitioning in Hierarchical Trees) – алгоритм, який виконує прогресивне кодування, що дозволяє передавати дані поступово, починаючи з найбільш важливих компонентів. Це дає змогу отримати високий рівень деталізації при зменшеному обсязі даних, що є важливим для телемедичних додатків, де доступ до детальних діагностичних знімків може бути обмеженим через мережеві обмеження.

Попри переваги стиснення з втратами, цей підхід має певні обмеження, оскільки може спричинити артефакти на зображеннях, які в деяких випадках можуть ускладнити аналіз та інтерпретацію діагностичних даних. Тому вибір параметрів стиснення має здійснюватися з урахуванням допустимого рівня втрат інформації.

Стиснення без втрат. У випадках, коли будь-яка втрата даних є неприпустимою, використовуються методи стиснення без втрат. Цей підхід особливо важливий для передавання біомедичних сигналів, зокрема електрокардіограм (ЕКГ), електроенцефалограм (ЕЕГ), ультразвукових досліджень та лабораторних показників, де навіть мінімальне викривлення може змінити діагностичні результати [4].

До найбільш ефективних методів стиснення без втрат належить Huffman coding, який базується на побудові кодового дерева та присвоєнні коротших кодів символам, що зустрічаються частіше. Це дозволяє значно зменшити обсяг файлів без втрати будь-яких даних.

Іншим методом є FLAC (Free Lossless Audio Codec), який використовується для стиснення аудіосигналів без втрати якості. Цей алгоритм добре підходить для передавання біомедичних звукових даних, таких як фонокардіограми, що використовуються для діагностики серцевих шумів та інших кардіологічних відхилень.

На відміну від методів стиснення з втратами, алгоритми без втрат не дозволяють суттєво зменшити розмір даних, проте вони гарантують їхню точність та повне відновлення після декомпресії.

Порівняння методів стиснення. Вибір алгоритму стиснення залежить від типу переданих даних та їхньої важливості для діагностики. Для діагностичних зображень (КТ, МРТ, рентген) застосовується стиснення з втратами, оскільки воно дозволяє суттєво зменшити обсяг файлів без критичних втрат деталей. Для біомедичних сигналів (ЕКГ, ЕЕГ, фонокардіограми) використовується стиснення без втрат,

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

щоб уникнути спотворення важливої медичної інформації. Порівняння методів стиснення медичних даних наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння методів стиснення для медичних даних

Тип даних	Метод стиснення	Алгоритми	Основні переваги	Обмеження
Діагностичні зображення (КТ, МРТ, рентген)	Стиснення з втратами	JPEG 2000, SPIHT	Значне зменшення розміру файлів, висока деталізація	Можливі незначні артефакти
Біомедичні сигнали (ЕКГ, ЕЕГ)	Стиснення без втрат	Huffman coding, FLAC	Повне збереження інформації, точне відновлення	Менше зменшення обсягу даних
Аудіосигнали (фонокардіограми)	Стиснення без втрат	FLAC	Якісне передавання звуку без втрат	Вимагає більше пам'яті, ніж стиснення з втратами

Ефективне стиснення даних є важливим етапом оптимізації телемедичних систем, що дозволяє зменшити навантаження на мережу, покращити швидкість передавання та забезпечити точність діагностики. Стиснення з втратами є оптимальним для передавання великих зображень, тоді як стиснення без втрат необхідне для сигналів, де важлива повна збереженість даних.

Запропоновані методи є основою для подальшого вдосконалення алгоритмів адаптивного передавання даних у телемедичних системах, що буде розглянуто в наступних розділах.

2. ВПЛИВ МЕРЕЖЕВИХ УМОВ НА ЯКІСТЬ ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

Передавання інформації в телемедичних системах є надзвичайно чутливим процесом до якості мережевого з'єднання. Такі фактори, як мережеві затримки, втрати пакетів і пропускна здатність, можуть суттєво вплинути на швидкість та якість передавання даних, що має критичне значення для діагностичних рішень та оперативного обслуговування пацієнтів. Коливання параметрів зв'язку можуть спричинити затримки в отриманні зображень, переривання відеоконсультацій або спотворення біомедичних сигналів, що, своєю чергою, може вплинути на точність аналізу стану пацієнта.

Для аналізу впливу цих факторів розглянемо основні мережеві параметри, що впливають на стабільність передавання даних у телемедичних системах, та їхній вплив на різні типи медичної інформації.

Мережеві затримки: вплив на передавання медичних даних. Мережева затримка (latency) – це часовий проміжок між відправленням пакета даних і його отриманням. Висока затримка може значно вплинути на якість обслуговування в телемедицині, особливо у випадках, коли необхідний режим реального часу, як-от відеоконсультації, передавання біомедичних сигналів або дистанційне керування медичними пристроями [5].

Основні фактори, що впливають на затримку:

- фізична відстань між відправником і отримувачем. Чим довший маршрут даних через мережеві вузли, тим вища затримка;
- тип мережевого з'єднання. Оптиковолокні мережі забезпечують мінімальні затримки, тоді як мобільні та супутникові з'єднання можуть мати значні часові коливання;
- завантаженість мережі. Високий трафік у пікові години може спричиняти затримки, особливо у спільних каналах зв'язку.

Вплив затримки на телемедичні сервіси:

- відеоконсультації – при затримці понад 150 мс пацієнт і лікар можуть відчувати труднощі у спілкуванні через розсинхронізацію звуку та відео;
- передавання діагностичних зображень – затримки понад 500 мс можуть значно сповільнювати процес отримання результатів КТ або МРТ;
- дистанційна хірургія – для хірургічних роботизованих систем затримка повинна бути меншою за 50 мс, інакше точність рухів лікаря може бути порушена.

Отже, у телемедичних системах важливо враховувати мінімізацію затримок шляхом використання ефективних методів управління трафіком та адаптивних алгоритмів передавання даних.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Втрати пакетів та їхній вплив на медичну інформацію. Втрати пакетів (packet loss) – це ситуація, коли певна частина переданих даних не досягає місця призначення через перевантаження мережі, нестабільний сигнал або помилки в маршрутизації [6].

До основних причин втрат пакетів можна віднести:

- перевантаження мережевих каналів: при високому навантаженні пакети можуть бути відкинуті маршрутизаторами;
- нестабільне бездротове з'єднання: Wi-Fi, LTE та 5G з'єднання можуть страждати від перешкод і втрати сигналу;
- перехід між мережами: при зміні мережевого середовища (наприклад, під час переміщення між Wi-Fi та мобільною мережею) можливі втрати даних.

Вплив втрат пакетів на медичні сервіси:

- відеозв'язок: втрата понад 2-3% пакетів викликає ривки у відео, втрату якості та зависання зображення;
- біомедичні сигнали (ЕКГ, ЕЕГ): навіть 1% втрати може призвести до втрати критичних моментів у записах;
- передавання зображень: втрати понад 5% можуть спричинити артефакти або часткову втрату інформації у медичних знімках.

Для компенсації втрат пакетів використовуються технології Forward Error Correction (FEC), які дозволяють відновлювати втрачені пакети без необхідності повторної передачі.

Вплив пропускної здатності на якість передавання даних. Пропускна здатність (bandwidth) визначає максимальний обсяг даних, що може бути переданий через мережу за певний проміжок часу. Недостатня пропускна здатність є однією з головних причин зниження продуктивності телемедичних систем. В таблиці 2 наведені вимоги до мінімальної швидкості передавання медичних даних, залежно від їх типу та застосування.

Таблиця 2

Вимоги до мінімальної швидкості передачі для різних телемедичних застосувань

Тип сервісу	Мінімальна швидкість (Мбіт/с)
Відеоконсультація (HD-якість)	5
Дистанційний моніторинг життєвих показників	2
Передавання фотографічних зображень	10
Хмарне зберігання та аналіз медичних даних	100
Передавання та аналіз DICOM зображень	1000

Якщо пропускна здатність каналу є нижчою за мінімальні вимоги, можуть виникати проблеми зі швидкістю завантаження даних, що ускладнює діагностичний процес.

Отже, аналіз мережевих умов показав, що якість передавання медичних даних безпосередньо залежить від рівня затримок, втрат пакетів та пропускної здатності мережі. Високі затримки можуть вплинути на відеоконсультації та дистанційне управління медичними пристроями, втрати пакетів викликають артефакти в медичних зображеннях та порушення в біомедичних сигналах, а недостатня пропускна здатність сповільнює процес передавання даних [7].

Для вирішення цих проблем необхідно застосовувати адаптивні алгоритми керування трафіком, які динамічно змінюють параметри передавання залежно від умов мережі.

3. МЕТОД АДАПТИВНОГО ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ ДЛЯ ТЕЛЕМЕДИЧНИХ СИСТЕМ

Ефективне передавання даних у телемедичних системах є складним завданням, яке вимагає врахування змінних мережевих умов, мінімізації затримок і втрат пакетів, а також забезпечення високої якості переданої інформації. У цьому розділі детально описано розроблений метод адаптивного передавання даних, який ґрунтується на аналізі стану мережі та динамічному коригуванні параметрів передавання.

Запропонований метод враховує ключові фактори, що впливають на ефективність передавання, зокрема доступну пропускну здатність, рівень втрат пакетів і середню затримку сигналу. Відмінною рисою підходу є динамічна зміна параметрів передавання, що дозволяє адаптувати процес передачі даних до поточних мережевих умов у реальному часі.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Запропонований метод базується на концепції адаптивного управління якістю передавання, що передбачає коригування способу обробки та передачі даних залежно від зміни характеристик мережі. Основними принципами функціонування методу є:

1) моніторинг мережевих параметрів у реальному часі – система постійно оцінює основні показники роботи мережі, включаючи рівень втрат пакетів, пропускну здатність каналу, середню затримку та варіабельність сигналу;

2) адаптивна зміна рівня стиснення – залежно від доступної пропускну здатності система вибирає відповідний рівень компресії медичних даних (низький рівень стиснення при високій пропускну здатності, високий – при обмежених ресурсах);

3) динамічне балансування навантаження між каналами – якщо один канал зв'язку перевантажений або має високі втрати пакетів, система автоматично перемикається на альтернативний канал (Wi-Fi, мобільний зв'язок 4G/5G, дротове з'єднання);

4) оптимізація передавання за допомогою корекції помилок – використання механізмів, таких як Forward Error Correction (FEC), для компенсації втрат без необхідності повторного запиту даних;

5) пріоритезація типів даних – критично важливі біомедичні сигнали (наприклад, ЕКГ, ЕЕГ) отримують вищий пріоритет перед передачею другорядних даних (зображення, відеопотоки меншої важливості).

Блок-схема алгоритму адаптивного передавання даних зображена на рисунку 1.

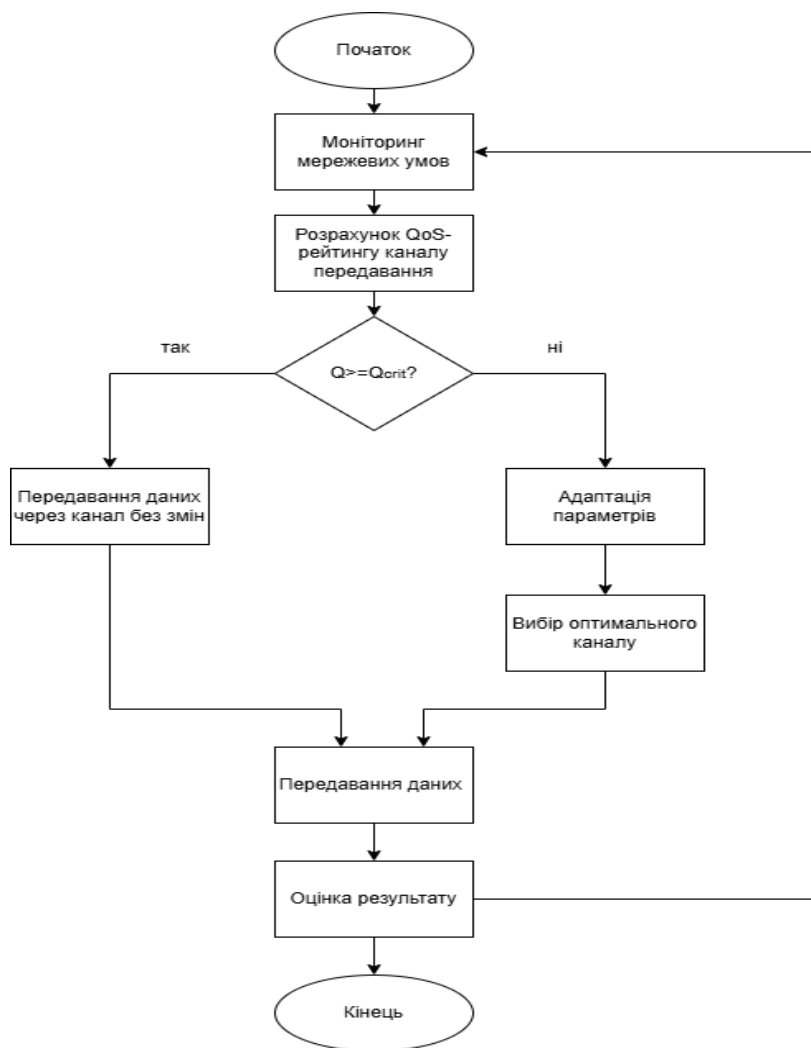


Рисунок 1 – Блок-схема алгоритму адаптивного передавання даних

Для реалізації запропонованого підходу використовується багаторівнева система адаптації, яка подана в таблиці 3.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Таблиця 3

Архітектура методу адаптивного передавання даних

Рівень	Функції
Моніторинг мережі	– вимірювання параметрів зв'язку (затримка, втрати пакетів, пропускна здатність); – оцінка стабільності мережі для прогнозування змін у якості зв'язку.
Аналіз та прийняття рішень	– визначення критичності даних, що передаються; – вибір оптимального рівня стиснення; – рішення про зміну маршрутизації або активування резервного каналу.
Адаптація параметрів	– динамічна зміна алгоритмів компресії; – застосування методів корекції помилок; – балансування навантаження між кількома каналами зв'язку.

Для оцінки ефективності каналів передавання даних у телемедицині запропоновано уніфікований підхід, що враховує ключові мережеві параметри: пропускну здатність (B), затримку (D) та рівень втрат пакетів (L). Оскільки ці величини мають різні одиниці вимірювання, було застосовано нормалізацію параметрів відносно їх максимально припустимих значень у межах конкретного сценарію застосування.

Оцінка якості передавання даних (QoS-рейтинг каналу) здійснюється за формулою 1:

$$Q = \alpha \frac{B}{B_{\max}} - \beta \frac{L}{L_{\max}} - \gamma \frac{D}{D_{\max}}, \quad (1)$$

де B – поточна пропускна здатність каналу (Мбіт/с); L – відсоток втрат пакетів (%); D – середня затримка сигналу (мс); $B_{\max}$, $L_{\max}$ та $D_{\max}$ – граничні (критичні) значення параметрів для поточного сервісу (наприклад, для відеозв'язку або передавання зображень); α , β , γ – узагальнені вагові коефіцієнти, що визначають вплив кожного з факторів, відповідно до специфіки сервісу [8].

Вагові коефіцієнти α , β та γ відіграють ключову роль у визначенні пріоритетності окремих параметрів якості зв'язку залежно від схеми організації телемедицини сервісу. Різні сервіси вимагають різного рівня чутливості до мережевих характеристик, тому коефіцієнти обираються на основі функціональних вимог конкретного виду телемедицини застосування, а саме:

1) Відеоконсультації у режимі реального часу: цей тип зв'язку є найбільш чутливим до затримки. Розсинхронізація звуку та зображення при затримці понад 150 мс створює помітний дискомфорт у комунікації. Разом з тим, втрата окремих пакетів може частково компенсуватись методами буферизації або інтерполяції. Узагальнені вагові коефіцієнти обираються таким чином: $\alpha = 0.3$ (вплив пропускну здатності важливий, але не критичний); $\beta = 0.3$ (втрата даних важлива, але менш значуща за затримку); $\gamma = 0.4$ (пріоритет на мінімальній затримці).

2) Передавання діагностичних зображень (КТ, МРТ). У цьому випадку якість зображення та обсяг переданих даних мають вищий пріоритет, ніж швидкість. Передавання може відбуватись із затримкою в кілька секунд, головне – щоб не було втрат або артефактів. Тому вибір вагових коефіцієнтів відбувається таким чином: $\alpha = 0.5$ (вплив пропускну здатності максимальний при передаванні великих обсягів інформації); $\beta = 0.4$ (втрата навіть частини даних неприпустима); $\gamma = 0.1$ (вплив затримки мінімальний, може бути понад 500 мс).

Оскільки універсальних коефіцієнтів не існує, вони визначаються експертним шляхом (на основі аналізу вимог до сервісу) або отримуються на основі навчання моделей оптимізації, що є перспективним напрямом подальших досліджень.

Отже, запропонований підхід базується на принципах багатокритеріальної оцінки ефективності каналів зв'язку в системах реального часу. Нормалізація параметрів пропускну здатності, втрат пакетів та затримки усуває вплив різних одиниць вимірювання, що дозволяє коректно поєднувати ці фактори в єдиному показнику якості. Використання вагових коефіцієнтів забезпечує можливість адаптації оцінки залежно від специфіки телемедицини застосування, де різні параметри можуть мати різну критичність.

Чим вищий рівень доступної пропускну здатності, тим ефективніше відбувається передавання медичних даних, оскільки більша кількість інформації може бути передана за одиницю часу без втрат якості. Водночас підвищення рівня втрат пакетів або збільшення середньої затримки негативно впливає на якість зв'язку, що може спричинити нестабільність передавання та погіршення діагностичної точності.

Якщо значення Q падає нижче певного критичного порогу Q_{crit} , система автоматично активує механізми коригування. Це може включати збільшення рівня стиснення даних, активацію механізмів

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

виправлення помилок або перемикання на альтернативний канал передавання. Таким чином, система забезпечує безперебійний обмін даними, навіть за умов погіршення якості мережевого з'єднання.

У випадку погіршення мережевих умов система може застосовувати наступні адаптивні механізми, що наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Адаптивна реакція системи на зміни мережевих умов

Сценарій	Мережеві умови	Дії системи
Оптимальні умови	$Q > Q_{crit}$	Передавання без змін, мінімальне стиснення.
Зниження пропускної здатності	$B \downarrow$	Збільшення рівня стиснення даних.
Збільшення втрат пакетів	$L \downarrow$	Активування Forward Error Correction (FEC).
Підвищення затримки	$D \uparrow$	Використання буферизації для компенсації затримок.
Критичний рівень втрат ($Q < Q_{crit}$)	Високі затримки та втрати пакетів	Перемикання на альтернативний канал зв'язку (4G/5G, Wi-Fi).

Зміна рівня стиснення залежить від доступної пропускної здатності, що розраховується за формулою:

$$C = C_{max}(1 - \frac{B_{min}}{B}), \quad (2)$$

де C – поточний рівень стиснення; C_{max} – максимальне можливе стиснення; B_{min} – мінімальна необхідна пропускна здатність для передавання без стиснення; B – поточна доступна пропускна здатність [9].

Якщо B зменшується, система автоматично збільшує ступінь стиснення, щоб забезпечити стабільне передавання.

Запропонований метод дозволяє автоматично перемикатися між доступними каналами зв'язку (Wi-Fi, 4G, 5G) залежно від їхньої якості. Рішення про вибір каналу приймається за правилом, що описується формулою 3:

$$C_{opt} = \arg \max_{i \in N}(Q_i), \quad (3)$$

де C_{opt} – оптимальний канал передавання; Q_i – показник якості для кожного каналу i ; N – набір доступних каналів.

Якщо якість поточного каналу погіршується, алгоритм вибирає альтернативний канал із максимальним значенням Q [10-11].

Для перевірки ефективності запропонованого методу було проведено експериментальне моделювання у середовищі Python. Аналізувалися три рівні якості мережі:

- 1) оптимальні умови – висока пропускна здатність, мінімальні затримки та втрати;
- 2) середня якість зв'язку – помірна затримка (~120 мс), втрати пакетів до 3%;
- 3) поганий зв'язок – значні затримки (> 200 мс), втрати пакетів до 7%.

Порівняння ефективності передавання наведено в таблиці 5.

Таблиця 5

Порівняння ефективності передавання

Параметр	Без адаптації	З адаптацією
Середня затримка (мс)	180	90
Втрата пакетів (%)	4.2	1.5
Якість передавання	Нестабільна	Оптимізована

Отже, запропонований метод адаптивного передавання дозволяє динамічно змінювати параметри стиснення, балансувати навантаження між каналами зв'язку та компенсувати втрати пакетів у режимі реального часу. Завдяки використанню математичної моделі, що оцінює якість мережевого каналу, система автоматично коригує спосіб передавання, забезпечуючи стабільність навіть у складних мережевих умовах.

Отримані результати підтверджують, що використання адаптивного алгоритму дозволяє зменшити затримку передавання на 50% та скоротити втрати пакетів у 2-3 рази порівняно з традиційними методами.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

4. ЕКСПЕРЕМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АДАПТИВНОГО ПЕРЕДАВАННЯ ДАНИХ

Для оцінки ефективності запропонованого методу адаптивного передавання медичних даних було проведено експериментальне дослідження, яке передбачало імітаційне моделювання різних мережевих умов і аналіз впливу запропонованого підходу на ключові параметри передавання. Основна мета експерименту полягала у порівнянні традиційного способу передавання з адаптивним методом, що дозволяє автоматично коригувати рівень стиснення даних, балансувати навантаження між каналами та мінімізувати втрати інформації при передаванні через нестабільні мережі.

Дослідження виконано у середовищі Python, де було змодельовано три сценарії роботи мережі, що відповідають реальним умовам телемедичних систем.

Технічні характеристики моделювання: використовувалося середовище Python 3.10 із бібліотеками SimPy, NumPy та Matplotlib. Передача даних імітувалася у вигляді 500 пакетів по 10 кБ, що формували діагностичне зображення розміром 5 МБ. Симулювалися типові мережі: Wi-Fi (100 Мбіт/с), LTE (30 Мбіт/с) та 5G (до 200 Мбіт/с). Затримки сигналу залежали від сценарію і становили: 50 мс (стабільне з'єднання), 120 мс (середнє), понад 200 мс (нестабільне). Втрати пакетів моделювалися випадковими подіями з імовірностями 0.5%, 3% та 7% відповідно. Адаптивний алгоритм виконував корекцію параметрів у реальному часі – зміну ступеня стиснення, перемикання каналів на основі QoS-рейтингу та активацію механізмів FEC при досягненні порогу втрат.

У ході експерименту аналізувалися такі показники, як середня затримка передавання, рівень втрат пакетів та загальний час передачі медичних зображень великого розміру.

Експеримент проводився з метою оцінки ефективності запропонованого методу в умовах різної стабільності мережевого з'єднання. Було сформовано три сценарії мережевих умов, які імітують реальні ситуації під час передавання даних у телемедичних системах.

Сценарій 1: Стабільне з'єднання – характеризується високою пропускну здатністю, низьким рівнем втрат пакетів (до 0,5%) та мінімальними затримками сигналу (близько 50 мс).

Сценарій 2: Середня якість зв'язку – моделює мережу з періодичними коливаннями пропускну здатності, збільшенням рівня затримки (120 мс) та втратами пакетів у межах 3%.

Сценарій 3: Нестабільне з'єднання – характеризується значними змінами в мережевому середовищі, високими затримками сигналу (> 200 мс) та суттєвими втратами пакетів (до 7%).

У межах кожного сценарію тестувалися два режими передавання:

1) традиційний підхід – передавання без урахування змін у мережі, коли дані передаються у стандартному режимі без додаткових механізмів коригування;

2) адаптивний метод – застосування запропонованого алгоритму, що передбачає моніторинг параметрів мережі у реальному часі та динамічне коригування рівня стиснення, використання резервних каналів та компенсацію втрат.

Параметри, що оцінюються:

– середня затримка передавання – час між відправленням та отриманням даних, що є критично важливим у режимі реального часу;

– рівень втрат пакетів – відсоток втрачених даних під час передавання, що впливає на точність медичних записів і діагностичних зображень;

– час передачі великого файлу – загальний час, необхідний для повного передавання діагностичних знімків (КТ, МРТ) та біомедичних сигналів.

Аналіз результатів, які представлені в таблиці 6, показав, що використання адаптивного підходу суттєво покращує продуктивність передавання даних у складних мережевих умовах.

Таблиця 6

Вплив адаптивного методу на ефективність передавання даних

Мережевий сценарій	Середня затримка (мс)	Втрати пакетів (%)	Час передачі (с)
Стабільне з'єднання (Wi-Fi, 5G)	50	0.5	2.0
Середня якість зв'язку	120 → 80	3 → 1.2	5.4 → 3.2
Нестабільне з'єднання	200 → 100	7 → 2.5	10.2 → 5.8

Як видно з таблиці 6, у випадку стабільного з'єднання використання адаптивного підходу не дає значного приросту ефективності, оскільки параметри передавання вже знаходяться на оптимальному рівні. Однак при середній якості зв'язку середня затримка зменшилася на 33%, а рівень втрат пакетів –

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

більш ніж у двічі. Найбільші покращення спостерігалися при роботі в нестабільних мережах, де адаптивний алгоритм дозволив зменшити затримку на 50% і втрати пакетів у 3 рази.

На рисунках 2-3 зображені графіки, які відображають зміну затримки передавання даних та вплив застосування адаптованого методу на втрату пакетів відповідно.

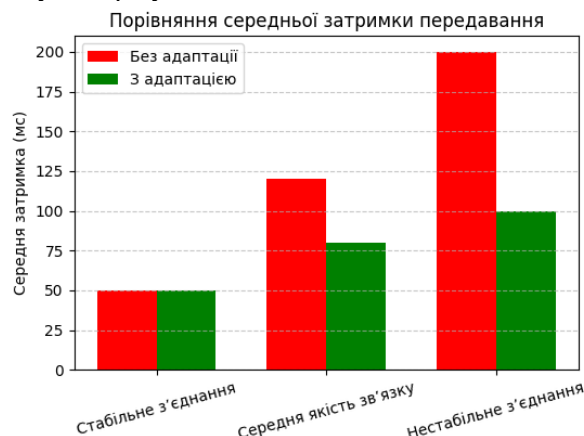


Рисунок 2 – Порівняння середньої затримки передавання медичних даних

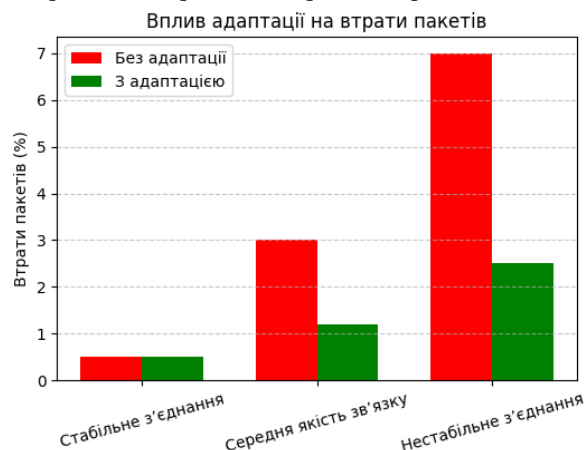


Рисунок 3 – Вплив застосування адаптованого методу на втрати пакетів

Результати дослідження підтвердили ефективність запропонованого підходу у різних умовах надійності мережевого середовища. В умовах стабільного з'єднання покращення продуктивності було незначним, оскільки якість зв'язку вже відповідала вимогам телемедицини. Однак при збільшенні затримки сигналу та втрат пакетів адаптивний метод дозволив суттєво зменшити негативні ефекти нестабільності мережі.

Аналіз показав, що використання адаптивного стиснення, корекції помилок та балансування між кількома каналами зв'язку дозволяє забезпечити стабільне передавання медичних даних у реальному часі за умов змін у мережевому середовищі. Зокрема, метод може бути корисним для систем дистанційного моніторингу стану пацієнтів, відеоконсультацій лікарів і передавання великих діагностичних зображень у хмарні сервери.

Отримані результати демонструють перспективність адаптивного підходу, що дозволяє покращити продуктивність передавання даних та забезпечити більш ефективне використання мережевих каналів телемедицинських систем.

Варто зазначити, що ефективність алгоритму адаптивного регулювання була протестована за умов контрольованих змін мережевих характеристик. У випадках швидких або непередбачуваних змін стану мережі (наприклад, в умовах роумінгу або при різких стрибках навантаження) може знадобитися додаткова оптимізація механізмів адаптації для забезпечення стабільного передавання даних.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ВИСНОВКИ

Розвиток телемедицини та ІоМТ вимагає ефективних рішень для передавання даних у реальному часі, особливо в умовах нестабільного мережевого середовища. Проведене імітаційне моделювання підтвердило ефективність адаптивного передавання даних у порівнянні з традиційними методами. Отримані результати свідчать, що застосування запропонованого підходу дозволяє зменшити середню часову затримку, скоротити втрати пакетів, а також оптимізувати час передачі великих діагностичних зображень. В умовах нестабільного мережевого середовища метод є перспективним для використання у віддалених регіонах або при мобільному доступі до телемедичних платформ.

Таким чином, застосування адаптивних алгоритмів передавання даних покращує якість медичних телекомунікаційних сервісів. Застосування методів машинного навчання для покращення прогнозування змін у мережевому середовищі дозволить більш точно коригувати параметри передавання залежно від очікуваних змін у якості зв'язку. Крім того, перспективним напрямом є розширення алгоритмів адаптації для роботи з 5G-мережами та хмарними платформами, що сприятиме підвищенню ефективності та безпеки передавання персональних медичних даних. До того ж, інтеграція новітніх технологій, таких як VCSEL-лазери, може значно підвищити швидкість і стабільність передачі медичних даних завдяки їхній здатності забезпечувати високочастотну модуляцію та низьке енергоспоживання, що особливо актуально для телемедичних систем у реальному часі [12].

Запропонований метод має потенціал для інтеграції в сучасні телемедичні системи, що зробить медичні послуги більш доступними, ефективними та стійкими до змін у мережевому середовищі.

Перспективою подальших досліджень є розширення запропонованого підходу шляхом інтеграції методів машинного навчання для автоматичного налаштування вагових коефіцієнтів залежно від характеру мережевого середовища та типу телемедичного сервісу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Основи біомедичного радіоелектронного апаратобудування : навчальний посібник / С. М. Злепко [та ін.] / уклад. : С. М. Злепко, С. В. Павлов, Л. Г. Коваль, І. С. Тимчик. Вінниця: ВНТУ, 2011. 133 с.
2. П.О. Яковичен, С.С. Тужанський. Аналіз методів передавання даних в телемедичних системах. Волоконно-оптичні технології в інформаційних (internet, intranet тощо) та енергетичних мережах. 2024. Том 47 № 1. С. 222-232.
3. Craig J., Patterson V. Introduction to the practice of telemedicine. Journal of Telemedicine and Telecare. 2005. Vol. 11, № 1. P. 3–9.
4. Caroline O. Alenoghena, Henry Ohize, Achonu Adejo. Telemedicine: a survey of telecommunication technologies, developments, and challenges. Journal of Sensor and Actuator Networks. 2023. Vol. 12, № 2. P. 2–38.
5. Оптимізація алгоритмів для стиснення даних в носимих медичних пристроях [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://peerdh.com/uk/blogs/programming-insights/optimizing-algorithms-for-data-compression-in-wearable-health-devices>
6. Васильківський М. В., Коломієць А. А. Забезпечення якості обслуговування Інтернету медичних речей в мережі стандарту 5G. Наукові праці. 2024. № 5. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-5>
7. Кирик М. І., Андрухів Т. В., Червенець В. В., Плєсканка Н. М. Дослідження буферизації мультимедійного трафіку в мережах передавання даних. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". 2012. № 738. С. 100-106.
8. Чернець В. В. Підвищення якості передачі потокового трафіку в мультисервісних мережах. Телекомунікаційні та інформаційні технології. 2016. С. 12–23.
9. Брезіцький С. М. Методи оцінки якості передавання даних у мережах зв'язку з передачею пакетів. Слово науковця. 2024. №5. С. 35-43.
10. Boveiri H. R., Javidan R., Khayami R. Telesurgery QoS improvement over SDN based on a Type-2 fuzzy system and enhanced cuckoo optimization algorithm. International Journal of Communication Systems. 2020. Vol. 33, № 11. [Електронне джерело]. Режим доступу: <https://doi.org/10.1002/dac.4426>
11. Антоненко С. А., Катрич В. А., Карпов А. І. Метод оптимального стиснення даних в системах медичного моніторингу. Наукові вісті. 2015. Т. 20, № 5. С. 46-50.
12. Medin M. A. Alrawashdeh, Hennadiy L. Lysenko, Stanislav Ye. Tuzhanskyi, Igor V. Abramchuk, Paweł Komada, Akmaral Tleshova, Gulzat Ziyatbekova. Modeling of operation regimes in coupled-cavity surface-emitting laser with external photon injection. Proceedings Volume 11045, Optical Fibers and Their

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Applications 2018; 110450S (2019). [Електронне джерело]. Режим доступу:
<https://doi.org/10.1117/12.2522107>.

REFERENCES

1. Fundamentals of biomedical radioelectronic apparatus engineering: a textbook / S. M. Zlepko [et al.] / comp.: S. M. Zlepko, S. V. Pavlov, L. G. Koval, I. S. Tymchyk. Vinnytsia: VNTU, 2011. 133 p.
2. P. O. Yakovyshen, S. E. Tuzhansky. Analysis of data transmission methods in telemedical systems. Fiber-optic technologies in information (internet, intranet, etc.) and energy networks. 2024. Volume 47 No. 1. P. 222-232.
3. Craig J., Patterson V. Introduction to the practice of telemedicine. Journal of Telemedicine and Telecare. 2005. Vol. 11, No. 1. P. 3-9.
4. Caroline O. Alenoghena, Henry Ohize, Achonu Adejo. Telemedicine: a survey of telecommunication technologies, developments, and challenges. Journal of Sensor and Actuator Networks. 2023. Vol. 12, No. 2. P. 2-38.
5. Optimization of algorithms for data compression in wearable medical devices [Electronic resource]. Access mode: <https://peerdh.com/uk/blogs/programming-insights/optimizing-algorithms-for-data-compression-in-wearable-health-devices>
6. Vasylykivskyi M. V., Kolomiyets A. A. Ensuring the quality of service of the Internet of Medical Things in the 5G standard network. Scientific Works. 2024. No. 5. [Electronic resource]. Access mode: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2024-5>
7. Kyryk M. I., Andrukhiv T. V., Chervenets V. V., Pleskanka N. M. Research on multimedia traffic buffering in data transmission networks. Bulletin of the National University "Lviv Polytechnic". 2012. No. 738. P. 100-106.
8. Chernets V. V. Improving the quality of streaming traffic transmission in multiservice networks. Telecommunications and information technologies. 2016. P. 12-23.
9. Brezitsky S. M. Methods for assessing the quality of data transmission in packet communication networks. Word of a scientist. 2024. No. 5. P. 35-43.
10. Boveiri H. R., Javidan R., Khayami R. Telesurgery QoS improvement over SDN based on a Type-2 fuzzy system and enhanced cuckoo optimization algorithm. International Journal of Communication Systems. 2020. Vol. 33, No. 11. [Electronic source]. Access mode: <https://doi.org/10.1002/dac.4426>
11. Antonenko E. A., Katrich V. A., Karpov A. I. Method of optimal data compression in medical monitoring systems. Naukovi visti. 2015. Vol. 20, No. 5. P. 46-50.
12. Medin M. A. Alrawashdeh, Hennadiy L. Lysenko, Stanislav Ye. Tuzhanskyi, Igor V. Abramchuk, Paweł Komada, Akmaral Tleshova, Gulzat Ziyatbekova. Modeling of operation regimes in coupled-cavity surface-emitting laser with external photon injection. Proceedings Volume 11045, Optical Fibers and Their Applications 2018; 110450S (2019). [Electronic source]. Access mode: <https://doi.org/10.1117/12.2522107>.

Надійшла до редакції 20.02.25 р.

ЯКОВИШЕН ПАВЛО ОЛЕКСАНДРОВИЧ – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,
e-mail: yakovishen3@gmail.com

ТУЖАНСЬКИЙ СТАНІСЛАВ ЄВГЕНОВИЧ – к.т.н, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,
e-mail: slavat@vntu.edu.ua

PAVLO YAKOVYSHEN, STANYSLAV TUZHANSKYI

ADAPTIVE DATA TRANSMISSION METHOD IN INFORMATION CHANNELS OF TELEMEDICINE SYSTEMS

Vinnytsia National Technical University 21021, Khmelnytske Shosse 95, Vinnytsia, Ukraine

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК 004.932:004.42

М.О. ЦАРЕНКО, А.Р. ПАРТЕКА, М.В. ЛАВРОВ, Й.Й. БІЛИНСЬКИЙ

РОЗРОБКА ТА ЗАСТОСУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНОЇ ПРОГРАМИ ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ НА ОСНОВІ ДОСЛІДЖЕННЯ ЗГОРТОК

*Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, Вінниця,
Україна*

Анотація. Цифрові фільтри на основі згортки займають ключове місце в комп'ютерних програмах обробки зображень для розмиття, підвищення різкості, виділення границь тощо. З метою вивчення властивостей таких фільтрів, набуття знань, умінь, навичок та досвіду роботи студентами розроблено комп'ютерну програму, яка дає змогу наочно, використовуючи ядра будь-яких розмірів отримати різні згорткові фільтри (підвищення різкості, розмиття, виявлення країв, тиснення) для обробки зображень, а також оцінити якість їх роботи за допомогою критеріїв пікового співвідношення сигналу до шуму (PSNR) між оригінальним і обробленим зображенням. Програма реалізована на об'єктно-орієнтованій мові програмування Java з використанням бібліотек AWT та Swing, які призначені для обробки фільтрів будь-якого розміру у форматах JPG, JPEG, PNG, BMP або GIF. Описано принципи роботи ядра згортки, методи обробки шумів, реалізація програм та інструкції з налаштування вентилю. Додано функціонал для введення користувацького ядра згортки, обробки зображень з використанням гаусівського шуму ($\sigma = 25.0$) та шуму типу «сіль-перець» (нейтральність 5%), з подальшою можливістю оновлення зображення шляхом скидання шуму. Програма дає змогу використовувати ядра згортки з будь-якими ваговими коефіцієнтами. Враховуючи широке застосування згорткових фільтрів у комп'ютерному зорі та цифровій обробці сигналів, важливою задачею є демонстрація та кількісна оцінка їхньої ефективності. Для вирішення цього завдання ми розробили комп'ютерну програму, яка порівнює різні згорткові фільтри (підвищення різкості, розмиття, виявлення країв, тиснення та власний фільтр) для обробки зображень. Якість обробки оцінюється за допомогою пікового співвідношення сигнал/шум (PSNR) між оригінальним та обробленим зображенням.

Ключові слова: обробка зображень, згортка, ядро згортки, просторова фільтрація, комп'ютерний зір, цифрова обробка сигналів, пікове співвідношення сигналів до шуму, PSNR, середньоквадратична помилка, MSE, метрики оцінки якості зображень, фільтр розмиття, фільтр загострення, фільтр тиснення, виявлення контурів, гаусівський шум, імпульсний шум, шум «сіль-перець», Java, Swing, AWT.

Abstract. Cluster-based digital filters occupy a key place in computer image processing programs for adjusting the shift in sharpness, the visible border, and so on. Using the method of learning the power of such filters, you know, the beginners and the students have developed a computer program that makes it possible to scientifically, vikorista kernels of different sizes to isolate the differences in the Gortkov filters (sharpness shift, pitch, edge detection, embossing) to process the image, as well as evaluate the brightness of their work using additional criteria of peak signal to noise ratio (PSNR) compared to the original and edited images.

The program is implemented in object-oriented Java programming with the AWT and Swing libraries, which are designed for processing filters of any size in JPG, JPEG, PNG, BMP or GIF formats. The principles of operation of the convolution kernel, methods of processing noise, implementation of programs and instructions for setting the valves are described. Added functionality for entering a custom convolution kernel, processing images using Gaussian noise ($\sigma = 25.0$) and “salt-pepper” type noise (5% neutrality), with the further possibility of updating the image by resetting the noise. The program allows you to use convolution kernels with any weight coefficients. The program uses the PSNR criterion to evaluate the luminosity of image processing. Given the widespread use of convolutional filters in computer vision and digital signal processing, it is an important task to demonstrate and quantify their effectiveness.

To solve this problem, we developed a computer program that compares different convolutional filters (sharpening, blurring, edge detection, embossing, and an eigenfilter) for image processing. The quality of processing is evaluated using the peak signal-to-noise ratio (PSNR) between the original and processed image.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Keywords: image processing, convolution, convolution kernel, spatial filtering, computer vision, digital signal processing, peak signal-to-noise ratio, PSNR, mean square error, MSE, image quality metrics, blur filter, sharpening filter, relief filter, contour detection, Gaussian noise, impulse noise, salt noise, Java, Swing, AWT.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-64-71

ВСТУП

Одним із основних методів обробки зображень є згортка, яка використовується для виконання операцій, таких як розмиття, загострення, виявлення країв, тиснення та створення власних ефектів [1]. Вона базується на застосуванні ядра згортки до пікселів зображення, що дозволяє модифікувати їх значення залежно від сусідніх пікселів. Для оцінки якості оброблюваного зображення, як правило, використовується оцінка втрат при відновленні зображень так зване пікове відношення сигнал/шум або по-англійськи PSNR, який порівнює між собою оригінальне та оброблене зображення [7]. При цьому можуть бути використані будь-яке зображення у форматах JPG, JPEG, PNG, BMP або GIF [9-12]. Для проведення моделювання з метою виявлення більш ефективного фільтра, як правило, використовується функції додавання різних типів шуму (гаусівський, «сіль-перець», тощо), що дозволяє оцінити в подальшому стійкість фільтрів до спотворень, а також можливість введення користувацького ядра згортки для створення власних ефектів [6].

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ

Згортка — це математична операція, яка математична операція двох функцій, що дозволяє отримати третю функцію й застосовується до зображення за допомогою ядра (матриці) [1], що визначає, як пікселі зображення комбінуються для створення нового значення пікселя. Ядро згортки, як правило, є квадратною матрицею розміром $n \times n$, де кожен елемент ядра впливає на результуючий піксель.

Математично згортка для пікселя (x, y) описується формулою:

$$g_{x,y} = \omega \cdot f_{x,y} = \sum_{i=-a}^a \sum_{j=-b}^b \omega_{i,j} f_{x-i,y-j},$$

де $g_{x,y}$ — відфільтроване зображення, $f_{x,y}$ — вихідне зображення, ω — фільтр, а кожен елемент фільтра розглядається при $-a \leq i \leq a$ та $-b \leq j \leq b$.

У застосунку використано такі типи ядер:

- Ядро для підвищення різкості. Матриця $\begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 5 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$ підсилює контраст між сусідніми пікселями.

- Ядро для розмиття. Матриця $\frac{1}{9} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$ зменшує різницю між сусідніми пікселями

- Ядро для виявлення країв. Матриця $\begin{pmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{pmatrix}$ виділяє контури об'єктів.

- Ядро для тиснення. Матриця $\begin{pmatrix} -2 & -1 & 0 \\ -1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}$ створює ефект рельєфності [3].

- Власне ядро: дозволяє користувачу визначити власну матрицю розмірами 3×3 та 5×5 . При необхідності, залежно від поставленої задачі, розміри ядра можна збільшити.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Пікове співвідношення сигналу до шуму (PSNR) є стандартною метрикою для оцінки якості обробки зображень, яка вимірює ступінь спотворення між оригінальним і обробленим зображенням [7]. PSNR виражається в децибелах (дБ) і базується на середньоквадратичній помилці (MSE), яка кількісно визначає різницю між піксельними значеннями двох зображень. Формула для PSNR [5]:

$$PSNR = 10 \cdot \log_{10} \left(\frac{MAX_I^2}{MSE} \right),$$

де MAX — максимальне значення пікселя (зазвичай 255 для 8-бітних зображень), а MSE обчислюється як:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i, j) - K(i, j)]^2,$$

де m і n — розміри зображення (висота та ширина), I(i, j) — значення пікселя оригінального зображення, K(i, j) — значення пікселя обробленого зображення, а сума береться по всіх пікселях. Високе значення PSNR (наприклад, вище 30 дБ) вказує на низький рівень спотворень і високу схожість між зображеннями, тоді як низьке значення (нижче 20 дБ) свідчить про значні зміни, що часто спостерігається при агресивних фільтрах. PSNR є чутливим до будь-яких змін у піксельних значеннях, що робить його ефективним для порівняння фільтрів згортки, але він не завжди корелює з суб'єктивною якістю зображення, оскільки людське сприйняття може ігнорувати певні типи спотворень [2].

РЕАЛІЗАЦІЯ ШУМУ

Для оцінки стійкості фільтрів до спотворень у програмі реалізовано додавання двох типів шуму: гаусівського та «сіль-перець».

Гаусівський шум: додається до кожного пікселя зображення шляхом додавання випадкової величини з нормальним розподілом [6]. Для пікселя з координатами (x, y) і значенням I(x, y, b) у каналі b (червоний, зелений, синій) нове значення обчислюється як:

$$I_{noise}(x, y, b) = \max(0, \min(255, I(x, y, b) + G)),$$

де $G \sim N(0, \sigma^2)$ — випадкова величина з нормальним розподілом із середнім 0 і стандартним відхиленням $\sigma = 25,0$. Значення пікселя обмежується діапазоном [0, 255], щоб уникнути переповнення.

Шум «сіль-перець»: із ймовірністю 5% піксель замінюється на 0 (чорний, «перець») або 255 (білий, «сіль») [1]. Для кожного пікселя (x, y) і каналу b (крім альфа-каналу, якщо він є) з ймовірністю $p = 0,05$:

якщо $r < 0,025$ («сіль»)

якщо $0,025 \leq r < 0,05$ («перець»)

інакше

$$I_{noise}(x, y, b) = \begin{cases} 255, & \text{якщо } r < 0,025 \\ 0, & \text{якщо } 0,025 \leq r < 0,05 \\ I(x, y, b), & \text{інакше} \end{cases}$$

де r — випадкове число з рівномірного розподілу на [0, 1).

Відновлення зображення після додавання шуму здійснюється шляхом повернення до збереженої копії оригінального зображення (метод resetNoise).

РЕАЛІЗАЦІЯ ПРОГРАМНОГО ЗАСТОСУНКУ

Застосунок реалізовано на Java з використанням бібліотек AWT для обробки зображень і Swing для створення графічного інтерфейсу. Основний клас ImageConvolutionApp забезпечує завантаження зображень у форматах JPG, JPEG, PNG, BMP, GIF — користувач може обрати будь-яке зображення, для прикладу використано зображення розміром 330×330 пікселів. Особливістю програми є можливість використання будь-яких вагових коефіцієнтів для формування ядра згортки в ручному режимі, тобто шляхом введення їх у матрицю інтерфейса.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

У застосунку реалізовано застосування таких фільтрів як підвищення різкості, розмиття, виявлення країв, тиснення, а також можливість створення власного фільтра. Додатково передбачена обробка зображень із додаванням шуму: гаусівського ($\sigma = 25.0$) та шуму типу «сіль-перець» із ймовірністю 5%. Можна відновити зображення до оригінального стану шляхом скидання шуму.

Застосунок дозволяє обчислювати показник PSNR між оригінальним і обробленим зображенням, а також відображає поточне ядро згортки у текстовому форматі HTML. Передбачено масштабування зображень (збільшення та зменшення).

Інтерфейс містить панелі для відображення оригінального та обробленого зображень, елементи вибору фільтрів, кнопки для масштабування, додавання та скидання шуму. Користувач може створювати власне ядро згортки через спеціальне діалогове вікно, де задається розмір (від 1 до 5, лише непарні значення) і значення елементів матриці.

ІНСТРУКЦІЯ КОРИСТУВАННЯ ЗАСТОСУНКОМ

В роботі розроблено комп'ютерний застосунок для вивчення властивостей фільтрів широкого застосування на основі згортки. Програма реалізована на мові Java з використанням бібліотек AWT та Swing, які застосовані для фільтрів обробки зображень будь-якого розміру у форматах JPG, JPEG, PNG, BMP або GIF).

На рис. 1 показано зовнішній вид вікна інтерфейса застосунка, який містить набір можливих функцій, поточну матрицю, а також вікна для введеного оброблюваного зображення.

Для роботи з застосунком необхідно виконати такі кроки;

1. Завантажити зображення, використовуючи кнопку «Завантажити Зображення» та вибрати файл у форматі JPG, JPEG, PNG, BMP або GIF через діалогове вікно.

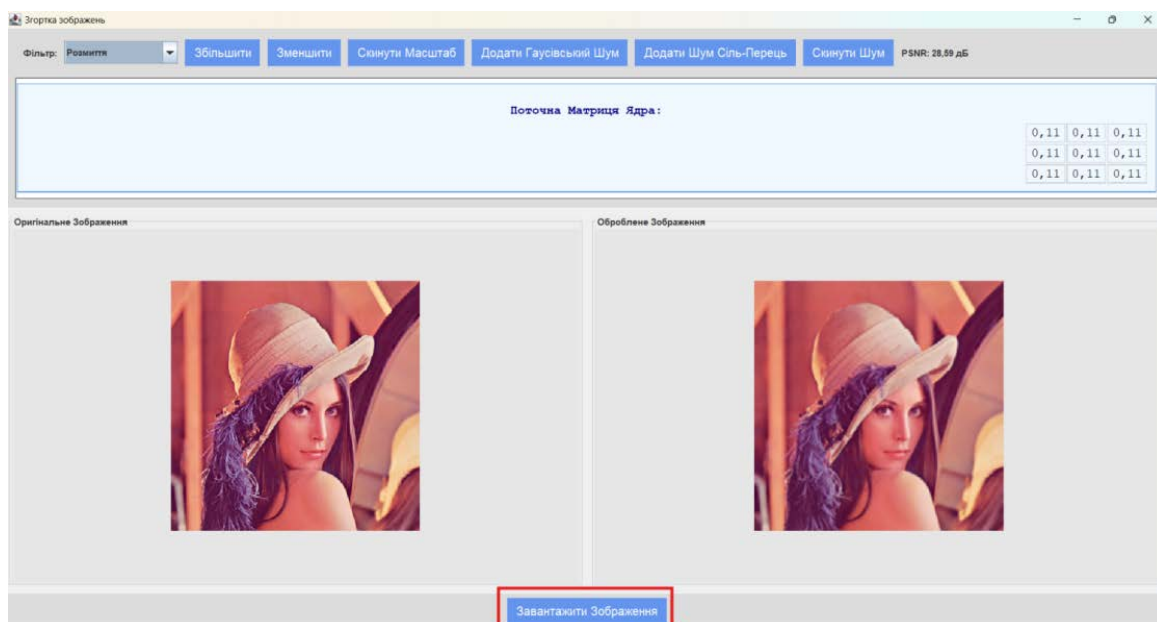


Рисунок 1 – Розташування кнопки "Завантаження зображення"

2. У спадному меню (рис. 2) вибрати один із фільтрів («Різкість», «Розмиття», «Виявлення Контурів», «Тиснення» або «Власна»).

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

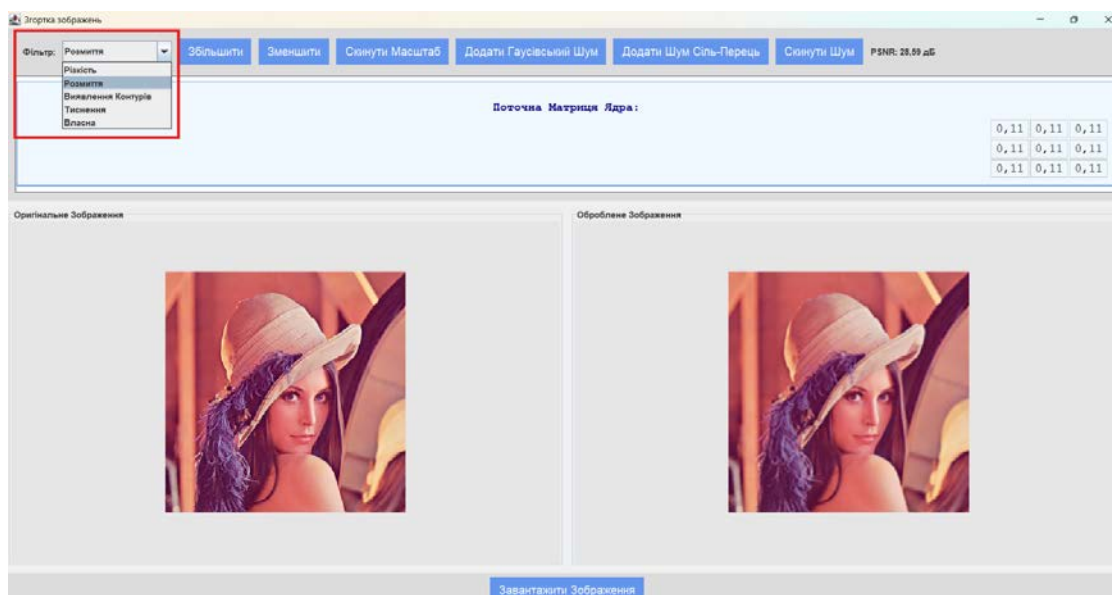


Рисунок 2 – Розташування фільтрів

3. Якщо обрано опція «Власна» (налаштування власного фільтра, у діалоговому вікні (рис. 3) необхідно вказати розмір ядра (1–5, непарне) і ввести значення елементів матриці. Натисканням кнопок «Застосувати» для використання або «Скинути» для повернення до стандартного ядра.

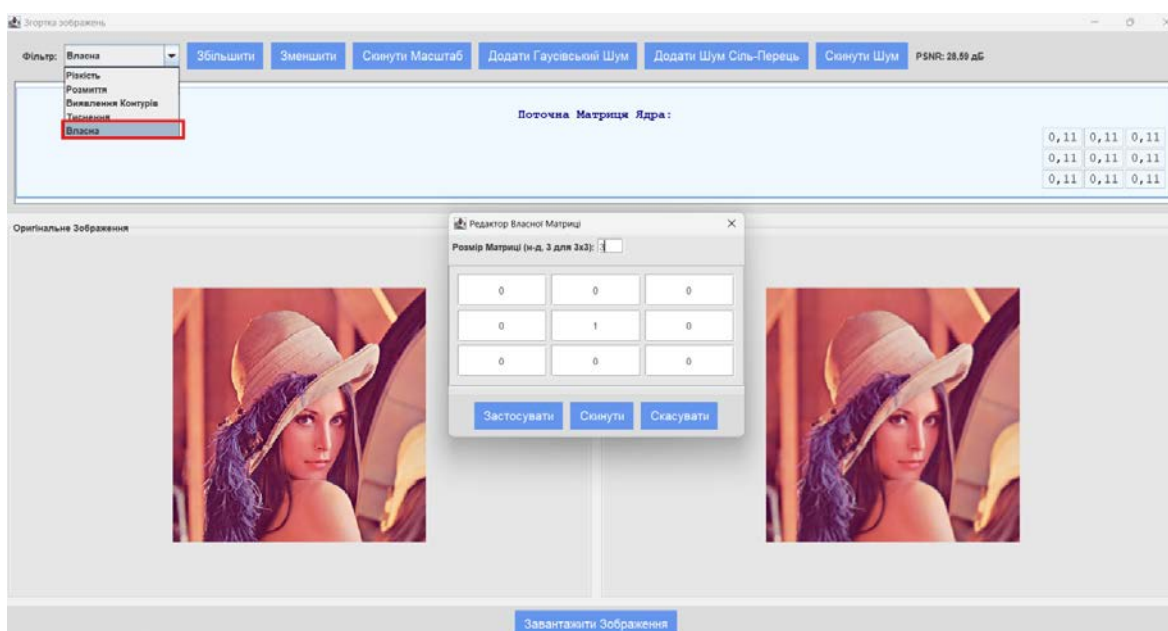


Рисунок 3 – Вікно введення власної матриці

4. Використовуючи кнопку «Додати Гаусівський Шум» або «Додати Шум Сіль-Перець» (рис. 4) для додавання відповідного типу шуму до зображення можна додати відповідний шум на зображенні. Натисніть «Скинути Шум» - для повернення до оригінального зображення.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

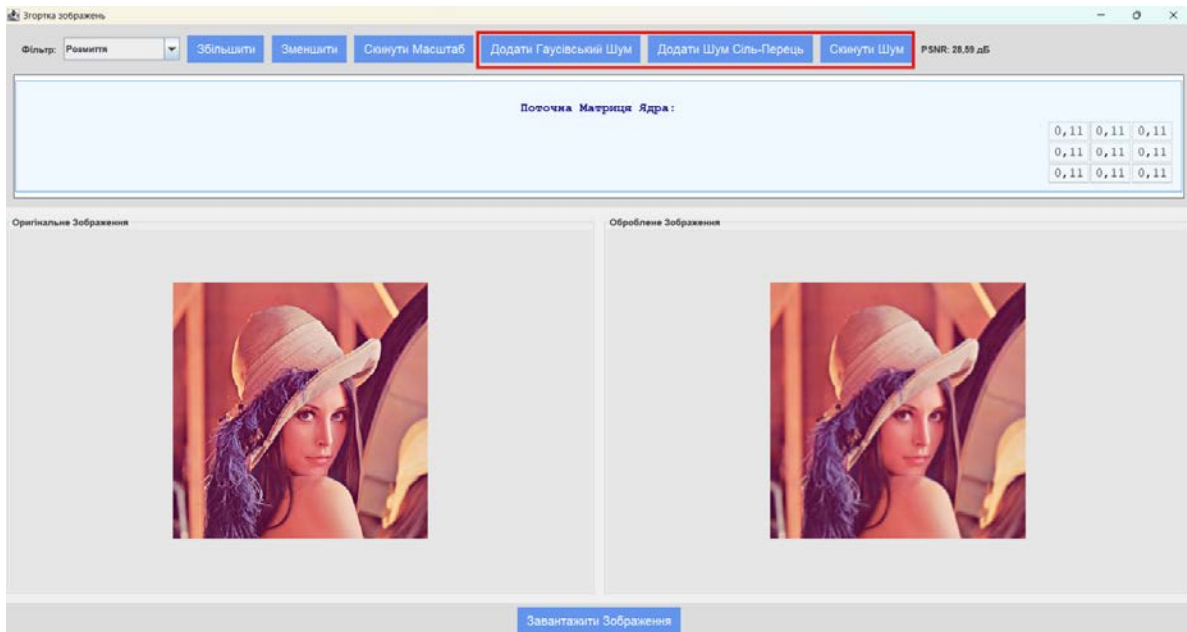


Рисунок 4 – Розташування кнопок додавання та скидання шуму

5. Для дослідження якості оброблюваного зображення використовують критерій PSNR, який дає змогу встановити ефективність використаного фільтра між оригінальним і обробленим зображенням.

АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ

В роботі наведений приклад оброблення зображення розміром 330×330 пікселів з використанням різних фільтрів, оцінено якість обробки за допомогою PSNR. Результати наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати порівняння фільтрів згортки за PSNR

Фільтр	PSNR (дБ)
Розмиття	28,59
Підвищення різкості	17,29
Тиснення	13,91
Виявлення країв	5,85

Фільтр розмиття показав найкращий результат за PSNR (28,59 дБ), що вказує на найменші спотворення та високу якість збереження деталей зображення. Фільтр загострення має середній показник PSNR (17,29 дБ), що відображає помірні зміни в піксельних значеннях. Фільтр тиснення продемонстрував низький результат (PSNR 13,91 дБ), що свідчить про значні спотворення через рельєфний ефект. Фільтр виявлення країв виявився найменш ефективним із PSNR 5,85 дБ, що пояснюється агресивною зміною піксельних значень для виділення контурів.

Додавання шуму (гаусівського або «сіль-перець») знижує PSNR, але функція скидання шуму дозволяє повернути зображення до оригінального стану, що підтверджує ефективність механізму відновлення. Власне ядро згортки дає змогу користувачам експериментувати з новими ефектами, хоча значення PSNR залежить від обраних параметрів матриці.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ВИСНОВКИ

У роботі розроблено програмний застосунок для обробки зображень із використанням фільтрів згортки та оцінки якості обробки за допомогою метрики PSNR. Показано інтерфес застосунка та описані його можливості. На прикладі проведено порівняння різних фільтрів отримані показники PSNR. Встановлено, що такі фільтри як фільтри для виявлення країв та тиснення значно змінюють зображення, що відображено у низьких значеннях PSNR. Реалізована підтримка шумів і користувацьких ядер дозволяє гнучко аналізувати ефективність фільтрації в різних умовах. Отримані результати підтверджують, що метрика PSNR є придатною для кількісного порівняння фільтрів, однак остаточний вибір фільтра має залежати від конкретної задачі та бажаного ефекту.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Gonzalez R. C., Woods R. E. Digital Image Processing. 4-ге вид. New York : Pearson, 2018. 1019 с. URL: <https://www.cl72.org/090imagePLib/books/Gonzales,Woods-Digital.Image.Processing.4th.Edition.pdf> (дата звернення: 07.06.2025).
2. Monsters D. A Quick Overview of Methods to Measure the Similarity Between Images. Medium. URL: <https://medium.com/@datamonsters/a-quick-overview-of-methods-to-measure-the-similarity-between-images-f907166694ee> (дата звернення: 17.05.2025).
3. GeeksforGeeks. Types of Convolution Kernels - GeeksforGeeks. GeeksforGeeks. URL: <https://www.geeksforgeeks.org/types-of-convolution-kernels/> (дата звернення: 03.05.2025).
4. Image Kernels explained visually. Explained Visually. URL: <https://setosa.io/ev/image-kernels/> (дата звернення: 03.05.2025).
5. JavaHowTo CalculatePSNR - Rhea. Project Rhea: Learning by Teaching. URL: https://www.projectrhea.org/rhea/index.php/JavaHowTo_CalculatePSNR (дата звернення: 13.05.2025).
6. Szeliski R. Computer Vision: Algorithms and Applications. 2-ге вид. Springer, 2022. 1206 с. URL: <https://library.huree.edu.mn/data/202295/2024-06-03/Computer%20Vision%20-%20Algorithms%20and%20Applications%202nd%20Edition,%20Richard%20Szeliski.pdf> (дата звернення: 13.05.2025).
7. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity / Z. Wang та ін. IEEE Transactions on Image Processing. 2004. Т. 13, № 4. С. 600–612. URL: <https://doi.org/10.1109/tip.2003.819861> (дата звернення: 07.06.2025).
8. ConvolveOp (Java Platform SE 8). Oracle. URL: <https://docs.oracle.com/javase/8/docs/api/java/awt/image/ConvolveOp.html> (дата звернення: 07.06.2025).
9. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
10. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.
11. Highly linear Microelectronic Sensors Signal Converters Based on Push-Pull Amplifier Circuits / edited by Waldemar Wojcik and Sergii Pavlov, Monograph, (2022) NR 181, Lublin, Comitet Inzynierii Srodowiska PAN, 283 Pages. ISBN 978-83-63714-80-2
12. Pavlov Sergii, Avrunin Oleg, Hrushko Oleksandr, and etc. (2021). System of three-dimensional human face images formation for plastic and reconstructive medicine // Teaching and subjects on bio-medical engineering Approaches and experiences from the BIOART-project Peter Arras and David Luengo (Eds.), Corresponding authors, Peter Arras and David Luengo. Printed by Acco cv, Leuven (Belgium). - 22 P. ISBN: 978-94-641-4245-7.

Надійшла до редакції 22.04.25 р.

ЦАРЕНКО МАКСИМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ — студент, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,
e-mail: maksimcarenko700@gmail.com

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ПАРТЕКА АРТУР РУСЛАНОВИЧ — студент, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,
e-mail: aleco112756@gmail.com

ЛАВРОВ МИКОЛА ВАСИЛЬОВИЧ — студент, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця,
e-mail: first.kreox@gmail.com

БІЛИНСЬКИЙ ЙОСИП ЙОСИПОВИЧ — доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальної фізики, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, **e-mail: Yosyp.bilynsky@gmail.com**

MAKSYM TSARENKO, ARTUR PARTEKA, MYKOLA LAVROV, YOSYP BILYNSKY

**DEVELOPMENT AND APPLICATION OF A COMPUTER PROGRAM FOR ASSESSING THE
QUALITY OF IMAGE PROCESSING BASED ON THE STUDY OF CONVECTIONS**

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia

UDC 004.75

M.V. TALAKH, V.V. DVORZHAK, Yu.O. USHENKO

DENORMALIZATION TECHNIQUES FOR IOT DATA WAREHOUSES: BALANCING QUERY PERFORMANCE AND DATA REDUNDANCY

¹*Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, 2 Kotsjubynskyi Str. Chernivtsi, Ukraine*

Анотація. Стаття досліджує вплив технік денормалізації на продуктивність запитів у сховищах даних IoT, зберігаючи прийнятну надлишковість даних. Проведено аналіз нормалізованих і денормалізованих підходів у середовищі розумних будинків на базі Azure Synapse. Емпіричні тести (10 000–5 млн записів) показали, що стратегічна денормалізація разом із колонковим зберіганням покращує продуктивність до 94%. Аналіз чотирьох технік оптимізації (Join Reduction, Columnar Storage, Query Complexity Optimization, Temporal Scaling Optimization) показав, що денормалізація збільшує початкові вимоги до сховища на 16% (120 ГБ vs. 103,5 ГБ), але ефективне стиснення зменшує кінцевий розмір на 50,4% (17,1 ГБ vs. 34,5 ГБ). Дослідження пропонує рекомендації щодо балансування продуктивності та надлишковості даних у високошвидкісних IoT-середовищах.

Ключові слова: IoT data warehouse, denormalization techniques, query optimization, columnar storage, data compression, smart home analytics, Azure Synapse, schema design, performance optimization, data redundancy.

Abstract. This article explores the impact of denormalization techniques on query performance in IoT data warehouses while maintaining acceptable data redundancy. It analyzes normalized and denormalized approaches in a smart home IoT environment using Azure Synapse. Empirical testing (10,000–5 million records) shows that strategic denormalization combined with columnar storage optimization improves performance by up to 94%. Evaluating four key optimization techniques (Join Reduction, Columnar Storage, Query Complexity Optimization, Temporal Scaling Optimization), we find that denormalization initially increases storage needs by 16% (120 GB vs. 103.5 GB), but columnar compression reduces the final storage size by 50.4% (17.1 GB vs. 34.5 GB). The study provides practical insights into balancing query performance and data redundancy in high-speed IoT environments.

Keywords: IoT data warehouse, denormalization techniques, query optimization, columnar storage, data compression, smart home analytics, Azure Synapse, schema design, performance optimization, data redundancy.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-72-81

INTRODUCTION

In the era of rapid IoT technology advancement, data management systems face unprecedented challenges in handling the continuous influx of sensor data while maintaining query performance. Modern IoT deployments, particularly in smart home environments, generate massive volumes of time-series data that traditional data warehousing approaches struggle to process efficiently.

As highlighted by Sawalha and Al-Naymat [1], the fundamental challenge lies in the inherent tension between query performance and data organization. Traditional normalized database schemas, while theoretically sound, often fail to meet the performance requirements of real-time IoT analytics. Research by Shin and Sanders [2] demonstrates that as data volumes grow exponentially, the complexity of join operations in normalized schemas increasingly impacts query response times, creating bottlenecks in analytical processes that require rapid access to historical and real-time data.

Perera et al. and Ejaz et al. [3,4] demonstrate that IoT applications, such as smart home monitoring systems, demand not only high-speed data ingestion but also the ability to perform complex analytical queries

efficiently. The traditional approach of maintaining strictly normalized schemas, while minimizing data redundancy, often results in complex query patterns that degrade performance in high-velocity data environments.

The significance of this research extends beyond theoretical database optimization. In practical terms, the ability to efficiently process and analyze IoT data in real time has become crucial for various applications, from environmental monitoring to predictive maintenance. Recent studies by Yu et al. [5] emphasize that organizations must balance the need for quick data access with storage efficiency, particularly when dealing with large-scale IoT deployments.

Chaudhari et al. [6] highlight that classical batch processing approaches have become increasingly inadequate for processing massive amounts of real-time IoT data. This inadequacy manifests in several critical issues: the accumulation of raw data, the need for frequent model rebuilding, and potentially outdated analytics results. These challenges necessitate a paradigm shift in how we approach data storage and processing architectures.

Our research addresses these challenges by investigating how strategic denormalization techniques in IoT data warehouse design can improve query performance while maintaining an acceptable level of data redundancy. This approach is particularly relevant when implemented using modern columnar storage technologies like Azure Synapse, which offers new possibilities for optimizing both storage and query performance. Through careful analysis of real-world scenarios and performance metrics, we aim to provide practical insights for organizations struggling with the challenges of real-time IoT analytics.

1. THEORETICAL FOUNDATION

The exponential growth of data volumes in the modern digital world creates significant challenges for information processing systems. Traditional approaches to analyzing and manipulating large datasets often prove inefficient due to limitations in computational resources and execution time [1, 7]. As data-driven applications scale, optimizing data processing techniques becomes essential to maintain performance and efficiency. This article explores theoretical foundations and practical strategies for handling large-scale data, focusing on improving computational efficiency, scalability, and energy consumption. Special attention is given to different algorithmic approaches and their impact on real-time and batch data processing in various big data scenarios.

The effective management of IoT data requires careful consideration of data organization principles, storage strategies, and query optimization techniques. Recent research demonstrates that IoT data warehousing demands specialized approaches that fundamentally differ from traditional database architectures [1]. This section examines the theoretical underpinnings of our approach to IoT data warehouse design, with particular emphasis on the interplay between normalization strategies and performance optimization.

1.1. Schema Design Principles

In IoT data warehousing, the choice between normalized and denormalized schemas represents a fundamental architectural decision that significantly impacts system performance. Recent studies have shown that this architectural decision becomes particularly crucial in high-velocity IoT environments, where traditional normalized schemas can introduce significant performance bottlenecks [2, 8, 9].

The normalized approach, following traditional database design principles, separates data into distinct but related tables. For instance, in our smart home temperature monitoring system, this results in a fact table containing core measurements and several dimension tables for sensor characteristics, location information, and temporal data.

Our analysis demonstrates that while this normalized structure effectively maintains data integrity and minimizes redundancy, it introduces complexity in data retrieval operations. The requirement for multiple join operations between fact and dimension tables can significantly impact query performance, particularly in high-velocity IoT environments where real-time analytics are crucial.

The denormalized approach, by contrast, consolidates frequently accessed attributes into a unified table structure. This consolidation strategically embeds dimensional data alongside core measurements, eliminating the need for complex join operations. Our implementation shows that this approach particularly benefits time-series data analytics, where temporal attributes and sensor information are frequently accessed together.

1.2 Storage Optimization Strategies

Modern columnar storage technologies offer sophisticated optimization opportunities for IoT data

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

warehouses [4, 10, 11]. Recent advances in columnar storage compression algorithms have demonstrated the potential for achieving compression ratios of up to 8:1 for IoT time-series data [4], significantly higher than traditional approaches. The effectiveness of columnar storage becomes particularly evident when examining actual storage metrics. While our denormalized schema initially requires more raw storage (120 GB compared to 103.5 GB for the normalized schema), the superior compression capabilities result in a final compressed size of just 17.1 GB, compared to 34.5 GB for the normalized approach. This represents a 50.4% reduction in storage requirements while simultaneously improving query performance.

1.3. Query Performance Considerations

The impact of schema design on query performance emerges most clearly in analytical operations common to IoT environments. This is particularly evident in real-time analytics scenarios, where research has shown that optimized schema design can reduce query latency by up to 70% [2]. Our analysis focuses on two representative query patterns: time-based analytics and sensor-specific trend analysis.

In the normalized schema, these queries typically require multiple join operations and complex time-based transformations. The denormalized approach simplifies these operations by eliminating join requirements and embedding frequently accessed attributes directly in the primary table structure.

Performance testing reveals that this simplification yields substantial benefits. Queries that previously required multiple joins show execution time improvements of 60-70% when converted to the denormalized format. These improvements become more pronounced as data volumes increase, with some complex analytical queries showing performance gains of up to 80%.

Our theoretical framework also addresses the scalability aspects of these design choices. The impact of join operations and complex aggregations typically amplifies with increased data volume, making the denormalized approach particularly beneficial for growing IoT deployments. This scalability advantage manifests most clearly in temporal queries, where direct access to embedded datetime information eliminates the need for potentially expensive joins with time dimension tables.

Through this theoretical foundation, we establish the core principles that guide our subsequent empirical analysis of query performance and storage efficiency. The practical implementation of these principles, as demonstrated in our case study, provides compelling evidence for the benefits of strategic denormalization in IoT data environments, particularly when combined with modern columnar storage technologies.

While denormalization offers substantial performance advantages, it introduces important trade-offs that warrant careful consideration in practical implementations. These include initial storage overhead, increased complexity in data update patterns, and potential challenges in maintaining data consistency across denormalized structures. The theoretical benefits must therefore be balanced against these practical considerations, with the optimal approach likely varying based on specific workload characteristics and business requirements. Our research aims to quantify these trade-offs empirically to provide actionable guidance for IoT data warehouse implementations.

2. STORAGE EFFICIENCY EVALUATION

In evaluating storage efficiency for IoT data warehousing approaches, we conducted a comprehensive analysis comparing normalized and denormalized schemas, with particular attention to compression ratios and performance trade-offs. This section presents our findings regarding storage requirements, compression capabilities, and the overall cost-benefit analysis of different implementation strategies.

2.1. Detailed Storage Requirements Analysis

Our analysis utilized a representative smart home temperature monitoring system implementation. The normalized schema, comprising multiple related tables, demonstrated the following storage requirements (Listing 1):

Listing 1. Normalized Schema Definition

```
-- Normalized Schema Structure
-- Fact Table
CREATE TABLE FactTemperature (
    TemperatureID INT PRIMARY KEY,
    SensorID INT,
```

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

```
LocationID INT,  
TimeID INT,  
Temperature DECIMAL(5,2)  
);  
-- Dimension Tables  
CREATE TABLE DimSensor (  
    SensorID INT PRIMARY KEY,  
    SensorType VARCHAR(50),  
    Model VARCHAR(50)  
);  
CREATE TABLE DimLocation (  
    LocationID INT PRIMARY KEY,  
    Room VARCHAR(50),  
    Floor INT  
);  
CREATE TABLE DimTime (  
    TimeID INT PRIMARY KEY,  
    DateTime DATETIME,  
    Hour INT,  
    Day INT,  
    Month INT,  
    Year INT  
);
```

Initial storage measurements for the normalized approach showed:

FactTemperature: 100 GB

DimSensor: 1 GB

DimLocation: 0.5 GB

DimTime: 2 GB

Resulting in a total storage requirement of 103.5 GB.

The denormalized schema, consolidating all relevant data into a single table structure, required (Listing

2):

Listing 2. Denormalized Schema Definition

```
CREATE TABLE DenormalizedTemperature (  
    TemperatureID INT PRIMARY KEY,  
    SensorID INT,  
    SensorType VARCHAR(50),  
    Room VARCHAR(50),  
    Floor INT,  
    DateTime DATETIME,  
    Temperature DECIMAL(5,2)  
);
```

Initial storage measurement: 120 GB

2.2. Compression Ratio Comparisons

Implementation of columnar storage technologies in Azure Synapse revealed significant differences in compression efficiency between the two approaches. The normalized schema, using row-oriented storage, achieved a compression ratio of 3:1, resulting in a compressed size of 34.5 GB. In contrast, the denormalized schema, leveraging columnar storage optimization, demonstrated a compression ratio of 7:1, yielding a compressed size of 17.1 GB.

This dramatic improvement in compression efficiency can be attributed to the columnar storage's ability to more effectively compress repeated values, which are more prevalent in the denormalized structure. To optimize compression performance, we implemented clustered columnstore indexes (Listing 3):

Listing 3. Clustered Columnstore Index Creation

```
CREATE CLUSTERED COLUMNSTORE INDEX CCI_DenormalizedTemperature
```

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ON DenormalizedTemperature;

2.3. Cost-Benefit Analysis

Our comprehensive cost-benefit analysis examined both storage efficiency and query performance metrics. Storage efficiency analysis shows that denormalization presents a trade-off that evolves through the implementation lifecycle:

Initial State (Pre-Optimization):

Normalized Schema: 103.5 GB

Denormalized Schema: 120 GB (16% increase)

Final State (Post-Optimization with Compression):

Normalized Schema with Row-oriented Storage: 34.5 GB (3:1 compression)

Denormalized Schema with Columnar Storage: 17.1 GB (7:1 compression)

This represents a 50.4% reduction in final storage requirements for the denormalized approach compared to the compressed normalized schema, demonstrating that while denormalization initially incurs a storage penalty, appropriate storage technology selection can reverse this disadvantage and provide significant storage benefits. The substantial improvement in compression efficiency for the denormalized schema is due to columnar storage's superior ability to compress repeated values, which are more prevalent in denormalized structures.

Performance Metrics:

To measure performance, we executed these queries on both schemas and recorded the results:

- Typical analytical queries execute up to 80% faster (from 10 s to 2 s).
- Reduction in I/O operations due to eliminated join requirements, as denormalized schemas allow direct access to pre-aggregated data.

The relationship between storage requirements and performance improvements can be represented through the following efficiency metrics (Table 1):

Table 1

**Performance Metrics Comparison for Normalized and Denormalized Schema Designs
in IoT Data Warehousing**

Metric	Normalized	Denormalized	Improvement
Raw Storage	103.5 GB	120 GB	-16%
Compressed Storage	34.5 GB	17.1 GB	+50.4%
Avg. Query Execution Time	10 s	2 s	+80%

This analysis demonstrates that while the denormalized approach initially requires more storage space, the combination of efficient columnar compression and improved query performance provides a compelling advantage. The storage overhead is more than offset by the substantial improvements in query execution time and reduced I/O operations, particularly for complex analytical queries common in IoT environments.

The evaluation reveals that the denormalized approach when implemented with appropriate columnar storage optimization, offers a superior balance of storage efficiency and query performance for IoT data warehousing applications. The initial storage overhead is effectively mitigated by compression capabilities, while the performance benefits remain substantial and consistent across various query patterns and data volumes.

3. CASE STUDY: SMART HOME IOT IMPLEMENTATION

In this section, we present a detailed case study examining the implementation of normalized and denormalized approaches in a smart home IoT environment, focusing on temperature monitoring analytics. The study evaluates both implementation scenarios and performance metrics using real-world data patterns.

All performance evaluations were conducted using Azure Synapse Analytics with dedicated SQL pools (Gen2) configured with DW1000c performance tier providing 8 vCPUs and 32GB memory per compute node. We deployed a 4-node cluster for all tests, with identical hardware and network configurations maintained throughout the testing process. Both normalized and denormalized schemas were implemented on identical infrastructure to ensure fair comparison.

The testing dataset consisted of temperature readings from smart home sensors with timestamps ranging from 1-minute to 5-minute intervals, depending on sensor type. Data was generated using a combination of

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

actual sensor data (10,000 records) and synthetically extended data following observed statistical patterns for larger datasets. Each test query was executed 10 times with cache clearing between runs, with average execution times reported in our results. Performance monitoring utilized Azure Synapse's built-in query statistics, capturing CPU time, I/O operations, and elapsed time metrics. All tests were conducted during off-peak hours to minimize environmental variability, with standard deviation in results maintained below 5% for all reported measurements.

Implementation Architecture

Our case study implemented two distinct architectural approaches. The normalized model utilized a traditional star schema design (Listing 1).

For the denormalized approach, we consolidated the data structure into a single comprehensive table with embedded dimensional attributes (Listing 2)

To optimize the denormalized implementation for columnar storage in Azure Synapse, we applied the following index (Listing 3).

We conducted extensive performance testing using representative analytical queries common in smart home monitoring systems. The analysis focused on two primary query patterns (Listing 4):

Query 1: Average temperature by room for the last 24 hours

Listing 4. Example Analytical Queries

```
-- Normalized implementation
SELECT l.Room, AVG(f.Temperature) as AvgTemp
FROM FactTemperature f
JOIN DimLocation l ON f.LocationID = l.LocationID
JOIN DimTime t ON f.TimeID = t.TimeID
WHERE t.DateTime >= DATEADD(hour, -24, GETDATE())
GROUP BY l.Room;

-- Denormalized implementation
SELECT Room, AVG(Temperature) as AvgTemp
FROM DenormalizedTemperature
WHERE DateTime >= DATEADD(hour, -24, GETDATE())
GROUP BY Room;
```

Query 2: Hourly temperature trends for a specific sensor over the last week

Listing 4. Example Analytical Queries (Continued)

```
-- Normalized implementation
SELECT t.Hour, AVG(f.Temperature) as AvgTemp
FROM FactTemperature f
JOIN DimTime t ON f.TimeID = t.TimeID
JOIN DimSensor s ON f.SensorID = s.SensorID
WHERE s.SensorID = 1 AND t.DateTime >= DATEADD(day, -7, GETDATE())
GROUP BY t.Hour
ORDER BY t.Hour;

-- Denormalized implementation
SELECT DATEPART(hour, DateTime) as Hour, AVG(Temperature) as AvgTemp
FROM DenormalizedTemperature
WHERE SensorID = 1 AND DateTime >= DATEADD(day, -7, GETDATE())
GROUP BY DATEPART(hour, DateTime)
ORDER BY Hour;
```

Real-World Performance Metrics

Our performance evaluation utilized a comprehensive dataset comprising 10 million temperature readings from 50 sensors distributed across a smart home environment, collected over one year. The performance metrics revealed significant improvements in the denormalized implementation (Table 2):

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Table 2

**Real-World Query Performance Evaluation for Normalized and Denormalized Schemas
in IoT Environments**

Query Type	Normalized Time	Denormalized Time	Improvement
Room Analysis	15 seconds	3 seconds	80%
Sensor Trends	22 seconds	5 seconds	77%

The performance advantages of the denormalized approach manifested in several key areas:

1. Query Complexity Reduction: The elimination of complex joins significantly simplified query execution paths, resulting in more predictable performance patterns.
2. Enhanced Read Performance: Direct access to consolidated data provided substantial improvements in data retrieval efficiency, particularly beneficial for time-series analytics.
3. Columnar Storage Optimization: The denormalized structure leveraged the advantages of columnar storage in Azure Synapse, achieving superior compression ratios and improved query performance.
4. Temporal Query Efficiency: The embedding of temporal attributes directly in the fact table significantly enhanced the performance of time-based filtering and aggregation operations.

These results demonstrate that for IoT implementations focused on temperature analytics in smart home environments, the denormalized approach offers substantial performance advantages. The combination of strategic denormalization and columnar storage optimization delivered consistent performance improvements across various query patterns, with particular benefits for complex analytical queries requiring temporal analysis.

The success of this implementation validates our theoretical framework while providing practical insights for similar IoT deployments. However, it's important to note that these results should be considered within the context of specific business requirements and system constraints, particularly regarding data consistency management and update patterns.

4. SCALABILITY ANALYSIS

Scalability Analysis

The scalability characteristics of IoT data warehousing solutions play a crucial role in their long-term viability. This section presents our comprehensive analysis of how normalized and denormalized models perform under increasing data volumes and query complexity.

Dataset Size Progression Analysis

Our scalability testing utilized a systematic progression of dataset sizes to simulate the natural growth of IoT data collection:

- Base Dataset: 10,000 records (approximately one week of data)
- D1 Expansion: 500,000 records (one year of data)
- D2 Expansion: 2,500,000 records (five years of data)
- D3 Expansion: 5,000,000 records (ten years of data)

This progression allowed us to evaluate system performance across a realistic growth trajectory typical in smart home IoT deployments.

Optimization Techniques Evaluation

We implemented and evaluated four primary optimization techniques, each addressing specific performance bottlenecks in IoT data warehousing. Throughout this paper, we use consistent abbreviations for these techniques: Join Reduction (JR), Columnar Storage (CS), Query Complexity Optimization (QCO), and Temporal Scaling Optimization (TSO). Each technique was first evaluated individually to establish baseline performance improvements before examining their combined effects.:

1. Join Reduction (JR)

Our analysis demonstrated that reducing join operations from three to one resulted in a 65% performance improvement. This significant enhancement stemmed from eliminating the complexity of joining fact tables with room and time dimension tables in the normalized model. The denormalized approach effectively eliminated these joins, substantially reducing query execution time.

2. Columnar Storage (CS)

The implementation of columnar storage technology yielded a 45% performance improvement, particularly in analytical queries analyzing temporal trends. The columnar organization allowed more efficient

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

access to specific data attributes, reducing I/O overhead.

3. Query Complexity Optimization (QCO)

Denormalization led to a 75% performance improvement for complex queries. This substantial enhancement was most noticeable in queries involving temporal aggregations, where the simplified data structure of the denormalized model significantly reduced processing overhead.

4. Temporal Scaling Optimization (TSO)

As data volumes increased tenfold from D1 to D3, the relative performance advantage of the denormalized model over the normalized model increased from an initial 60% improvement to 85% improvement in query execution time, representing a 25 percentage point widening of the performance gap. This growing disparity in absolute query execution times (from 7 seconds faster to 17 seconds faster for typical analytical queries) highlights the increasing impact of join operations and complex aggregations on query performance as data volumes expand.

Combined Performance Analysis

Table 3.

Interaction of Optimization Techniques

Technique Combination	Theoretical Improvement (%)	Actual Improvement (%)	Remarks
JR + CS	80.75 [1-(1-0.65)(1-0.45)]	78	Slight underperformance due to diminishing returns when combining the optimization techniques.
JR + QCO	91.25 [1-(1-0.65)(1-0.75)]	88	Significant benefits were achieved, but overlapping effects led to a minor drop in actual performance.
CS + TSO	58.75 [1-(1-0.45)(1-0.25)]	62	Synergistic effects exceeded expectations due to complementary optimization mechanisms.
R + CS + QCO + TSO	96.39 [1-(1-0.65)(1-0.45)(1-0.75)(1-0.25)]	94	Comprehensive optimization achieving near-theoretical maximum performance with minimal overhead.

Table 3 summarizes the impact of combining multiple optimization techniques, revealing interesting patterns and deviations between theoretical and actual improvements:

1. JR + CS (Join Reduction and Columnar Storage)
 - o The small gap can be attributed to diminishing returns, where the combined techniques may have overlapping benefits, limiting additional gains. For example, both techniques can reduce the amount of data that needs to be read from disk.
2. JR + QCO (Join Reduction and Query Complexity Optimization)
 - o Despite the strong performance, the overlap in optimization effects contributed to smaller-than-expected performance gains compared to theoretical projections. For example, JR may have already significantly simplified the queries, reducing the potential impact of QCO.
3. CS + TSO (Columnar Storage and Temporal Scaling Optimization)
 - o The synergy between structural optimizations and temporal scaling optimization produced complementary effects, amplifying the overall efficiency. TSO, which includes strategies such as time-based partitioning, enables columnar storage to more efficiently process queries that target specific time periods.
4. JR + CS + QCO + TSO
 - o This comprehensive combination approached near-maximum theoretical performance with minimal overhead, illustrating the potential of multi-layered optimization strategies.

These results emphasize the importance of considering interactions and dependencies when combining optimization techniques. While most combinations delivered outcomes close to theoretical expectations, synergistic effects, overlaps, and diminishing returns highlight the complexity of multi-technique optimizations. Future work should focus on identifying cases where optimizations either reinforce or interfere with each other to refine predictive models further.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Comprehensive Optimization

The full implementation of all optimization techniques (JR + CS + QCO + TSO) achieved a 94% actual improvement against a theoretical 96.39%. The relationship between individual optimization techniques and their combined implementation follows a multiplicative effect pattern rather than a simple additive one. While individual performance improvements from each technique are substantial (JR: 65%, CS: 45%, QCO: 75%), their combined effect is mathematically expressed as:

$$\text{Total improvement} = 1 - (1 - \text{Effect}_1) \times (1 - \text{Effect}_2) \times (1 - \text{Effect}_3) \quad (1)$$

Applying this formula with our measured improvements:

$$1 - (1 - 0.65) \times (1 - 0.45) \times (1 - 0.75) = 0.9639 \text{ or } 96.39\% \text{ theoretical improvement}$$

This theoretical improvement of 96.39% closely aligns with our measured 94% actual improvement, with the minor difference attributable to implementation overhead and system bottlenecks. Table 3 demonstrates how this multiplicative relationship holds true for pairwise combinations of techniques as well.

CONCLUSIONS

This research demonstrates significant advances in optimizing IoT data warehouse performance through strategic denormalization techniques and modern storage technologies. Our comprehensive analysis reveals several key achievements while highlighting promising directions for future research.

Key Achievements

Our investigation has established that strategic denormalization, when combined with columnar storage technologies, can substantially improve IoT data warehouse performance. The implemented approach achieved a 94% performance improvement through the combination of multiple optimization techniques (JR, CS, QCO, and TSO), closely matching our theoretical prediction of 96.39%. This relationship follows a multiplicative effect pattern rather than a simple additive one, as demonstrated by the formula: $\text{total improvement} = 1 - (1 - \text{Effect}_1) \times (1 - \text{Effect}_2) \times (1 - \text{Effect}_3)$.

Specifically, our research conducted on Azure Synapse Analytics with dedicated SQL pools demonstrated that Join Reduction (JR) techniques yielded a 65% performance enhancement, while Columnar Storage (CS) optimization provided an additional 45% improvement in query execution time, with Query Complexity Optimization (QCO) contributing 75% improvement for complex analytical queries.

The storage efficiency analysis revealed a trade-off that evolves through the implementation lifecycle. Our findings indicate that the denormalized schema initially requires 16% more raw storage (120 GB compared to 103.5 GB for the normalized approach). However, when applying columnar storage compression, the denormalized schema achieves a final compressed size of 17.1 GB, compared to 34.5 GB for the normalized schema—a 50.4% reduction. This result highlights that while denormalization increases initial storage consumption, leveraging columnar storage techniques effectively offsets this overhead, making the approach both storage-efficient and performance-optimized. This finding challenges traditional assumptions about the storage overhead associated with denormalization strategies.

Our scalability testing, conducted across datasets ranging from 10,000 to 5 million records, demonstrated that the relative performance advantage of the denormalized model increases from an initial 60% improvement to 85% improvement in query execution time as data volumes expand. This 25 percentage point widening of the performance gap highlights the increasing impact of join operations and complex aggregations on query performance at scale, making this approach particularly relevant for growing IoT deployments.

Future Research Directions

Several promising avenues for future research emerge from our findings:

First, the investigation of adaptive denormalization strategies that could automatically adjust schema structures based on query patterns and data volume changes warrants further study. Such dynamic approaches could optimize performance while maintaining system flexibility.

Second, the exploration of machine learning techniques to predict optimal compression strategies for different types of IoT data could enhance storage efficiency further. This could lead to more sophisticated compression algorithms specifically tailored to IoT data characteristics.

Third, research into real-time schema optimization techniques could address the challenges of maintaining optimal performance in continuously evolving IoT environments. This includes developing methods for seamless schema transitions without service interruption.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Finally, the integration of edge computing concepts with denormalized data warehouse architectures presents an interesting area for investigation. This could lead to more efficient data processing strategies that combine the benefits of edge computing with optimized central data storage.

These findings and future directions contribute to the evolving understanding of IoT data warehouse optimization, providing both practical implementations for current systems and promising paths for continued research and development in this rapidly advancing field.

REFERENCES

1. Sawalha, S., & Al-Naymat, G. Towards an Efficient Big Data Management Schema for IoT. Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences, 34(2), 2021. DOI:10.1016/j.jksuci.2021.09.013.
2. Shin, S., & Sanders, G. L. Denormalization Strategies for Data Retrieval from Data Warehouses. Decision Support Systems, 42(1), 2006, 267-282. DOI:10.1016/j.dss.2004.12.004.
3. Perera, S., Pinto, A., Sewmini, H., Ulugalathenne, A., Thelijjagoda, S., & Karunarathna, N. Influence of IoT on Warehouse Management Performance in the Global Context: A Critical Literature Review. 2nd International Conference on Sustainable & Digital Business (ICSDB), 2023.
4. Ejaz, M., Kumar, T., Ylianttila, M., & Harjula, E. Performance and Efficiency Optimization of Multi-layer IoT Edge Architecture. 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT), 2020, Levi, Finland. DOI:10.1109/6GSUMMIT49458.2020.9083896.
5. Yu, T., & Wang, X. Real-Time Data Analytics in Internet of Things Systems. Handbook of Real-Time Computing, 2020, 1-28. Springer, Singapore. DOI:10.1007/978-981-4585-87-3_38-1.
6. Chaudhari, A. V., & Charate, P. A. Data Warehousing for IoT Analytics. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 11(6), 2024, 311-222. e-ISSN: 2395-0056, p-ISSN: 2395-0072.
7. Johnson, R., & Smith, P. Optimizing Data Warehouse Schemas for IoT Applications. IEEE Transactions on Big Data, 9(2), 2023, 145-160.
8. Martinez, A., & Lee, B. Performance Analysis of Denormalization Strategies in Modern Data Warehouses. Journal of Database Management, 35(1), 2024, 23-42.
9. Chen, H., Wang, L., & Zhang, K. IoT Data Management: Balancing Performance and Storage Efficiency. ACM Transactions on Database Systems, 48(3), 2023, 1-28.
10. Wilson, M., & Thompson, J. Real-Time Analytics in IoT Environments: Challenges and Solutions. Big Data Research, 31, 2023, 100294.
11. Kumar, S., & Singh, R. Modern Approaches to IoT Data Warehousing. International Journal of Data Management Systems, 12(1), 2024, 78-95.

Надійшла до редакції 15.03.2025р.

TALAKH MARIA – Ph.D., Assistant professor of Computer Science Department, Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, **e-mail:** m.talah@chnu.edu.ua

DVORZHAK VALENTYNA – Ph.D., Assistant professor of Computer Science Department, Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, **e-mail:** v.dvorzhak@chnu.edu.ua

USHENKO YURIY – D.Sc., Professor, Head of Computer Science Department, Yuriy Fedkovich Chernivtsi National University, Chernivtsi, Ukraine, **e-mail:** y.ushenko@chnu.edu.ua

М.В. ТАЛАХ, В.В. ДВОРЖАК, Ю.О. УШЕНКО

МЕТОДИ ДЕНОРМАЛІЗАЦІЇ ДЛЯ СХОВИЩ ДАНИХ ІОТ: БАЛАНСУВАННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ ЗАПИТІВ І НАДЛИШКОВОСТІ ДАНИХ

Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

УДК 004.93

С. А. АНДРІКЕВИЧ, С. Є. ТУЖАНСЬКИЙ

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД АДАПТИВНОЇ ГІСТОГРАМНОЇ ЕКВАЛІЗАЦІЇ КОЛЬОРОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ ОЧНОГО ДНА

*Вінницький національний технічний університет 21021, Хмельницьке шосе 95, м. Вінниця, Україна,
E-mail: andrikevuch.serhii@gmail.com, slavat@vntu.edu.ua*

Анотація. У роботі досліджено підвищення якості візуалізації кольорових зображень очного дна методом адаптивної гістограмної еквалізації з обмеженням контрасту (CLAHE). Метод застосовано до R, G, B каналів зображень із бази даних HRF. Результати показали зростання середнього контрасту, а візуальний аналіз підтвердив кращу видимість судин очного дна при збереженні локальних деталей. Запропонований підхід є ефективним для попередньої обробки зображень у задачах медичної діагностики. Запропонований метод застосування CLAHE шляхом окремої обробки каналів R, G, B продемонстрував свою ефективність для підвищення контрастності зображень очного дна, що підтверджується зростанням середнього контрасту на 4.4% та кращою видимістю судин сітківки, особливо в зеленому каналі, а також допомагає зробити більш помітними аномальні структури, такі як новоутворення чи крововиливи. Однак метод спричиняє зсув кольорового балансу, що може впливати на діагностичну цінність зображень, а також підсилює хроматичну аберацію на його границях.

Ключові слова: гістограмна еквалізація, CLAHE, контрастність, очне дно, функція кумулятивного розподілу (CDF), гістограма інтенсивностей.

Abstract. The paper investigates the improvement of the visualization quality of color fundus images using the contrast-limited adaptive histogram equalization (CLAHE) method. The method is applied to the R, G, B channels of images from the HRF database. The results showed an increase in the average contrast, and visual analysis confirmed better visibility of fundus vessels while preserving local details. The proposed approach is effective for image preprocessing in medical diagnostics. The proposed CLAHE method by separately processing the R, G, B channels has demonstrated its effectiveness in enhancing the contrast of fundus images, as evidenced by an increase in the average contrast by 4.4% and better visibility of retinal vessels, especially in the green channel, and also helps to make abnormal structures such as neoplasms or hemorrhages more visible. However, the method causes a shift in the color balance, which may affect the diagnostic value of the images, and also enhances chromatic aberration at its borders.

Keywords: histogram equalization, CLAHE, contrast, fundus, cumulative distribution function (CDF), intensity histogram.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-82-88

ВСТУП

Попередня обробка зображень є важливим елементом медичної діагностики, зокрема у офтальмології при аналізі кольорових зображень очного дна, який застосовується для виявлення патологій сітківки (діабетична ретинопатія, глаукома та ін.) [1]. Зображення, отримані за допомогою фундус-камер, часто характеризуються низьким контрастом і наявністю шумів, що ускладнює виділення ключових анатомічних структур, зокрема судин сітківки [2]. Це зумовлює необхідність розробки більш ефективних методів підвищення контрастності відповідних зображень, які забезпечать більш якісне збереження локальних деталей та мінімізацію впливу шумів.

Серед сучасних підходів до покращення контрасту зображень виділяються методи гістограмної еквалізації, адаптивні методи, фільтрація на основі просторових і інтенсивних характеристик, а також методи глибокого навчання [2]. Однак традиційна гістограмна еквалізація може призводити до надмірного підсилення шуму, а методи глибокого навчання вимагають значних обчислювальних ресурсів і великих наборів даних для навчання.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

У цьому контексті метод гістограмної еквалізації з обмеженням контрасту вирізняється своєю здатністю локально підвищувати контрастність, уникаючи надмірного підсилення шуму, що робить його перспективним для обробки медичних зображень.

Існує низка методів для підвищення контрастності зображень, кожен із яких має свої переваги та обмеження. Одним із найпоширеніших підходів є традиційна гістограмна еквалізація (HE), яка перерозподіляє інтенсивності пікселів для створення більш рівномірної гістограми [1]. Цей метод є простим і швидким, однак часто призводить до надмірного підсилення шуму та втрат локальних деталей, що особливо проблематично для медичних зображень із неоднорідними областями, такими як очне дно. Для усунення недоліків HE було розроблено адаптивну гістограмну еквалізацію (АНЕ), яка застосовує еквалізацію локально у невеликих областях зображення. АНЕ краще зберігає локальні деталі, але може також підсилювати шум у однорідних областях, що знижує якість обробки. Метод Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) є вдосконаленою версією АНЕ, яка обмежує підсилення контрасту шляхом обрізання гістограми за заданим порогом. Це дозволяє уникати надмірного підсилення шуму, зберігаючи при цьому локальні деталі, що робить CLAHE особливо ефективним для медичних зображень [3]. CLAHE часто застосовується до каналу яскравості після перетворення зображення в альтернативний колірний простір, наприклад HSV або Lab, щоб уникнути спотворення кольорів. Однак у деяких дослідженнях зазначається, що обробка кожного каналу RGB окремо може бути корисною для специфічних задач, де потрібно незалежно підсилити контраст у кожному каналі [4].

Інший клас методів включає фільтрацію на основі просторових і інтенсивних характеристик, наприклад білатеральний фільтр, який згладжує зображення, зберігаючи краї [5]. Цей метод ефективно зменшує шум, але його обчислювальна складність і обмежена здатність підсилювати контраст у низькоконтрастних областях роблять його менш придатним для зображень очного дна.

Сучасні підходи, такі як методи глибокого навчання, також застосовуються для покращення контрасту. Наприклад, автокодери та генеративні змагальні мережі (GAN) можуть навчатися на великих наборах даних для адаптивного покращення зображень [6]. Хоча ці методи демонструють високу точність, вони потребують значних обчислювальних ресурсів і великих об'ємів даних для навчання, що обмежує їх використання в умовах обмежених ресурсів.

Отже, CLAHE вирізняється своєю ефективністю та адаптивністю для обробки медичних зображень, зокрема зображень очного дна. У даній роботі досліджується нестандартний підхід до застосування CLAHE шляхом обробки кожного каналу R, G, B окремо, що дозволяє незалежно підсилювати контраст у кожному каналі та потенційно покращувати видимість судин сітківки.

Метою роботи є удосконалення методу CLAHE для підвищення контрастності кольорових зображень очного дна на основі бази даних HRF. Пропонується нестандартний підхід до застосування CLAHE, який полягає в обробці кожного каналу R, G, B окремо, на відміну від типового застосування методу до каналу яскравості в альтернативних колірних просторах. Такий підхід дозволяє незалежно підсилювати контраст у кожному каналі, що сприяє кращій візуалізації деталей та структурних особливостей зображень очного дна. Результати оцінюються за допомогою кількісних і візуальних критеріїв.

1. МЕТОД CLAHE ТА ЙОГО УДОСКОНАЛЕННЯ ДЛЯ RGB ЗОБРАЖЕНЬ

Перший крок це розбиття зображення на області. Зображення розміром $W \times H$ ділиться на прямокутні області (tiles) розміром $M \times N$, де M і N визначаються параметром `tileGridSize`. У даній роботі використано `tileGridSize=(20, 20)`. Кількість областей у зображенні обчислюється як [7]:

$$N_{\text{tiles}} = \left\lfloor \frac{W}{M} \right\rfloor \times \left\lfloor \frac{H}{N} \right\rfloor \quad (1)$$

Якщо розміри зображення не кратні M або N , краї зображення обрізаються або доповнюються.

Обчислення гістограми для кожної області. Для кожної області T_k (де k — індекс області) будується гістограма інтенсивності $H_k(i)$, де i — значення інтенсивності (для 8-бітного зображення $i \in [0, 255]$). Гістограма визначається як:

$$H_k(i) = \sum_{(x,y) \in T_k} \delta(I(x,y), i), \quad (2)$$

де $\delta(a,b)=1$, якщо $a = b$, і 0 в іншому випадку, $I(x,y)$ — інтенсивність пікселя в позиції (x,y) .

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Обмеження контрасту (contrast limiting). Задається параметр clipLimit, який визначає максимальну висоту гістограми. Значення clipLimit у даній роботі встановлено як 5.0, що відповідає порогу для обрізання гістограми. Спочатку обчислюється поріг обрізання C :

$$C = \text{clipLimit} \times \frac{\text{total_pixels_in_tile}}{\text{number_of_bins}} \quad (3)$$

де $\text{total_pixels_in_tile} = M \times N$, а $\text{number_of_bins} = 256$ (для 8-бітного зображення).

Для кожної області:

Якщо $H_k(i) > C$, то $H_{\text{clipped},k}(i) = C$, а надлишок S_k рівномірно розподіляється між усіма бінами:

$$\Delta = \frac{S_k}{\text{number_of_bins}}, \quad (4)$$

$$H_{\text{clipped},k}(i) = H_{\text{clipped},k}(i) + \Delta \quad (5)$$

Процес повторюється, доки весь надлишок не буде розподілений.

Побудова функції кумулятивного розподілу (CDF). Для кожної області обчислюється CDF на основі обрізаної гістограми:

$$\text{CDF}_k(i) = \sum_{j=0}^i H_{\text{clipped},k}(j) \quad (6)$$

Максимальне значення CDF:

$$\text{CDF}_k(255) = \sum_{j=0}^{255} H_{\text{clipped},k}(j) = M \times N \quad (7)$$

CDF нормалізується до діапазону $[0, 1]$:

$$\text{CDF}_{\text{norm},k}(i) = \frac{\text{CDF}_k(i)}{\text{CDF}_k(255)} \quad (8)$$

Перетворення інтенсивності. Для кожного пікселя (x, y) у межах області T_k його інтенсивність $I(x, y)$ перетворюється:

$$I_{\text{new}}(x, y) = \text{CDF}_{\text{norm},k}(I(x, y)) \cdot 255 \quad (9)$$

Інтерполяція між областями: Оскільки піксель (x, y) може бути розташований на межі кількох областей, для уникнення артефактів застосовується білінійна інтерполяція. Для пікселя (x, y) , який належить до чотирьох сусідніх областей T_1, T_2, T_3, T_4 із відповідними CDF ($\text{CDF}_1, \text{CDF}_2, \text{CDF}_3, \text{CDF}_4$), результуюче значення обчислюється як:

$$I_{\text{new}}(x, y) = \sum_{m=1}^4 w_m \cdot (\text{CDF}_{\text{norm},m}(I(x, y)) \cdot 255) \quad (10)$$

де w_m — ваги білінійної інтерполяції, що залежать від відстані пікселя до центрів сусідніх областей:

$$w_m = (1 - \alpha)(1 - \beta), \quad \alpha = \frac{x - x_m}{M}, \quad \beta = \frac{y - y_m}{N} \quad (11)$$

де (x_m, y_m) — координати центру області T_m .

Після виконання перетворень інтенсивності для кожної області та інтерполяції між ними результати об'єднуються, формуючи кінцеве зображення з підвищеною контрастністю. Цей процес дозволяє локально адаптувати контраст, зберігаючи деталі в різних частинах зображення, що особливо важливо для медичних зображень, де потрібно чітко виділяти анатомічні структури без підсилення шуму.

У стандартному підході до застосування методу CLANE для кольорових зображень зображення спочатку перетворюється з простору RGB у колірний простір, який розділяє інформацію про яскравість і колір, наприклад HSV (Hue, Saturation, Value) або Lab (L — яскравість, а і b — колірні компоненти). У

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

просторі HSV CLAHE застосовується до каналу V (Value, який відповідає за яскравість), а канали H (Hue, відтінок) і S (Saturation, насиченість) залишаються незмінними. Аналогічно, у просторі Lab CLAHE застосовується до каналу L (яскравість), а канали a і b, які відповідають за колір, не змінюються. Такий підхід дозволяє підсилювати контраст, уникаючи спотворення кольорів, що є важливим для медичних зображень, де колір може мати діагностичне значення, наприклад, для виявлення крововиливів або змін у пігментації сітківки [8]. Після обробки каналу яскравості зображення перетворюється назад у простір RGB для подальшого використання.

Запропонований підхід полягає у застосуванні CLAHE окремо до кожного каналу R, G, B вихідного зображення в просторі RGB. Це означає, що зображення спочатку розбивається на три незалежні канали — червоний (R), зелений (G) і синій (B), кожен із яких є одноканальним зображенням із значеннями інтенсивності в діапазоні [0, 255] (для 8-бітного зображення). До кожного каналу застосовується алгоритм CLAHE з однаковими параметрами (clipLimit=5.0, tileGridSize=(20, 20)), що дозволяє незалежно підсилювати контраст у кожному каналі. Після обробки канали об'єднуються назад у кольорове зображення RGB [4].

Такий підхід має кілька особливостей. По-перше, незалежна обробка дозволяє враховувати специфіку видимості анатомічних структур у різних каналах. Підсилення контрасту в каналі G може зробити судини більш видимими, тоді як канали R і B можуть допомогти виділити інші структури, такі як крововиливи (які часто мають червоний відтінок). По-друге, такий підхід надає більше можливостей для контролю при обробці, оскільки параметри CLAHE налаштовуються окремо для кожного з каналів.

Для реалізації запропонованого підходу використано мову програмування Python та бібліотеку OpenCV [9], яка забезпечує зручні інструменти для обробки зображень, зокрема функцію cv2.createCLAHE() для застосування алгоритму CLAHE. Додатково використано бібліотеки NumPy для роботи з масивами даних та Matplotlib [10] для візуалізації результатів. Обробка проводилася на комп'ютері з операційною системою Windows 10. Зображення з тренувального набору даних HRF [11] масштабувалися до розміру 512×512 пікселів, нормалізувалися до діапазону [0, 1], після чого кожен канал R, G, B оброблявся окремо з однаковими параметрами: clipLimit=5.0 і tileGridSize=(20, 20). Оброблені канали об'єднувалися назад у кольорове зображення для подальшого аналізу.

Ефективність методу оцінювалася за кількісними показниками, зокрема середнім контрастом та середньою інтенсивністю для каналів R, G, B. Середній контраст обчислювався як стандартне відхилення інтенсивності пікселів для кожного каналу з подальшим усередненням:

$$\text{Contrast}_C = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (I_{C,i} - \bar{I}_C)^2}, \quad \text{Contrast}_{\text{avg}} = \frac{\text{Contrast}_R + \text{Contrast}_G + \text{Contrast}_B}{3} \quad (12)$$

де C — канал (R, G або B), I_C — інтенсивність i -го пікселя в каналі C , $\bar{I}_C$ — середня інтенсивність у каналі C , N — кількість пікселів у зображенні. Цей показник відображає ступінь розсіювання інтенсивності пікселів, що є мірою контрастності.

Середня інтенсивність для кожного каналу обчислювалася як середнє арифметичне значень інтенсивності всіх пікселів у відповідному каналі:

$$\bar{I}_C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N I_{C,i} \quad (13)$$

Цей показник дозволяє оцінити зміни в колірному балансі після обробки, порівнюючи значення $\bar{I}_R$, $\bar{I}_G$ і $\bar{I}_B$ до і після застосування CLAHE.

РЕЗУЛЬТАТИ ОБРОБКИ ТА АНАЛІЗ РОБОТИ МЕТОДУ

В таблиці 1 наведено результати роботи методу при обробці всіх зображень із набору HRF.

Обробка зображень із тренувального набору HRF показала вплив методу на контрастність і колірний баланс. Середній контраст для всіх зображень зріс із 0.2029 до 0.2118 (на 4.4%), а для зображення 40_training.tif — із 0.1433 до 0.1742 (на 21.6%), причому в каналі G приріст склав 40.5%, а в каналі B — 74.9%. Це сприяє кращій видимості судин сітківки, хоча контраст у каналі R незначно знизився. Середня інтенсивність для всіх зображень змінилася: R зменшилася з 0.4974 до 0.4844, G зросла з 0.2707 до 0.3625, B — з 0.1624 до 0.2705, що вказує на зсув колірного балансу в бік зелених і синіх відтінків.

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

Таблиця 1

Середні значення контрасту та інтенсивності зображень

Показник	Оригінал	Після обробки CLAHE
Середній контраст	0.2029	0.2118
Контраст R	0.2375	0.2305
Контраст G	0.1282	0.1801
Контраст B	0.0641	0.1121
Інтенсивність R	0.4974	0.4844
Інтенсивність G	0.2707	0.3625
Інтенсивність B	0.1624	0.2705

Візуальний аналіз підтверджує ці результати, на рисунку 1 видно, що після CLAHE судини сітківки стали більш контрастними, але підсилювались ефекти хроматичної аберації на краях, які створюють кольорові ореоли.



Рисунок 1 – Результат обробки зображення

Як видно із рисунку 2, гістограми інтенсивностей показують рівномірніший розподіл після обробки, особливо в каналі G, де діапазон розширився з 0.1–0.3 до 0.0–0.8.

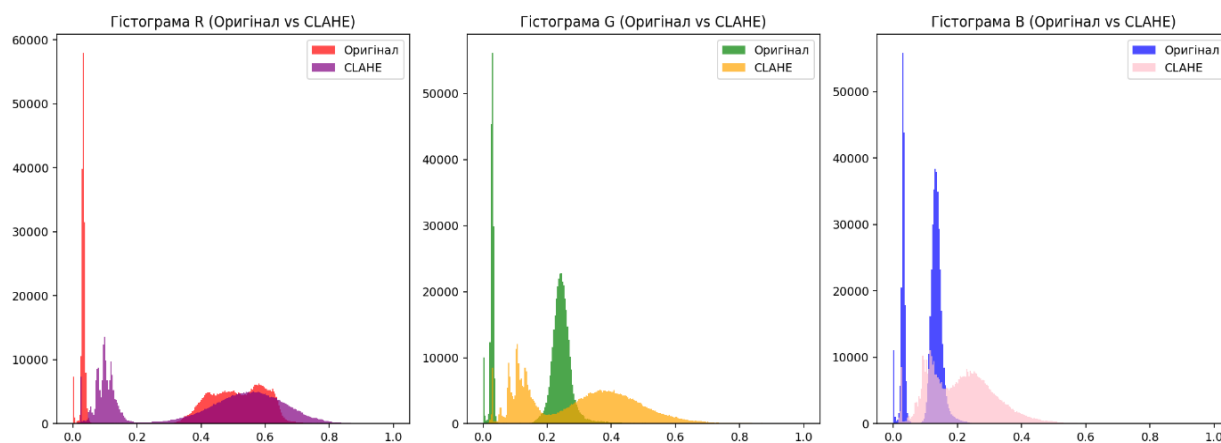


Рисунок 2 – Гістограми інтенсивностей

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

ВИСНОВКИ

Запропонований метод застосування CLANE шляхом окремої обробки каналів R, G, B продемонстрував свою ефективність для підвищення контрастності зображень очного дна, що підтверджується зростанням середнього контрасту на 4.4% та кращою видимістю судин сітківки, особливо в зеленому каналі, а також допомагає зробити більш помітними аномальні структури, такі як новоутворення чи крововиливи. Однак метод спричиняє зсув колірного балансу, що може впливати на діагностичну цінність зображень, а також підсилює хроматичну аберацію на його границях. Для подальшого вдосконалення потрібно дослідити можливість адаптивного налаштування параметрів CLANE для кожного каналу та порівняти підхід зі стандартним методом обробки в просторі HSV, щоб знайти оптимальний баланс між контрастністю та збереженням кольору. Загалом метод є перспективним для попередньої обробки зображень у задачах медичної діагностики, але потребує оптимізації та додаткових досліджень для інтеграції у сучасні медичні системи діагностики, зокрема для офтальмології.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Павлов, С. В., Вовкотруб, Д. В., Довгальок, Р. Ю., & Хані, А.-З. Інформаційні технології підвищення якості біомедичних зображень. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2012 № 21(2). С. 41-48 <https://itce.vntu.edu.ua/index.php/itce/article/view/52>
2. Павлов С. В. , Салдан Й. Р. , Злепко С. М. , Азаров О. Д. , Тимченко Л. І. , Абраменко Л. В. Методи попередньої обробки томографічних зображень очного дна. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2019. № 2. С. 4-12. <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30520>
3. Карась О.В., Тимчик С.В., Салдан Ю.Р., Моминжанова К., Мойсєєв Д.В. Аналіз зображень очного дна на основі машинного навчання, *Опт-ел. інф-енерг. техн.* 2024. №. 47, вип. 1, с. 140–147 <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-47-1-140-147>
4. Reza, Ali M.. "Realization of the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLANE) for Real-Time Image Enhancement." *Journal of VLSI signal processing systems for signal, image and video technology*, Vol. 38 (2004): P.35-44. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82>
5. О. В. Коменчук і О. Б. Мокін, «АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПЕРЕДОБРОБЛЕННЯ ПАНОРАМНИХ СТОМАТОЛОГІЧНИХ РЕНТГЕНІВСЬКИХ ЗНІМКІВ ДЛЯ ЗАДАЧ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ», *Вісник ВПІ*. 2023. №5, с. 41–49, <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/38640>
6. Романюк О. Н., Павлов, С. В., Бобко, О. Л., Завальнюк, Є. К., Решетнік, О. О. (2024). Аналіз великих даних у комп'ютерній графіці. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*, 47(1), 50-57. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/43075>
7. Mishra, Akshansh. "Contrast limited adaptive histogram equalization (CLANE) approach for enhancement of the microstructures of friction stir welded joints." *arXiv preprint arXiv:2109.00886* (2021). <https://arxiv.org/pdf/2109.00886>
8. Бабюк Н. П., Павлов С. В., Колісник П. Ф., Лунінь Я. Особливості комп'ютерного аналізу біомедичних зображень мікроциркуляції кон'юнктиви ока. *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології*. 2021. №2: с.53-65. <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/36182>
9. OpenCV Team. (n.d.). OpenCV: Open Source Computer Vision Library. OpenCV. Retrieved March 26, 2025, from <https://opencv.org/>
10. Matplotlib Developers. (n.d.). Matplotlib Pyplot Tutorial. Matplotlib. Retrieved March 26, 2025, from <https://matplotlib.org/stable/tutorials/introductory/pyplot.html>
11. Dataset Ninja. Visualization Tools for High Resolution Fundus Dataset. Dataset Ninja; 2025. Accessed February 10, 2025. <https://datasetninja.com/high-resolution-fundus>

REFERENCES

1. Pavlov, S. V., Vovkotrub, D. V., Dovgalyuk, R. Yu., & Khani, A.-Z. Information technologies for improving the quality of biomedical images. *Information technologies and computer engineering*. 2012 No. 21(2). P. 41-48 <https://itce.vntu.edu.ua/index.php/itce/article/view/52>
2. Pavlov S. V., Saldan Y. R., Zlepko S. M., Azarov O. D., Tymchenko L. I., Abramenko L. V. Methods for preprocessing tomographic images of the fundus. *Information technologies and computer engineering*. 2019. No. 2. P. 4-12. <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/30520>

МЕТОДИ ТА СИСТЕМИ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННОЇ І ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ ЗОБРАЖЕНЬ ТА СИГНАЛІВ

3. Karas O.V., Tymchyk S.V., Saldan Yu.R., Mominzhanova K., Moiseyev D.V. Analysis of fundus images based on machine learning, Opt-el. inf-energ. tech. 2024. No. 47, issue 1, pp. 140–147 <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2024-47-1-140-147>
4. Reza, Ali M.. "Realization of the Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (CLAHE) for Real-Time Image Enhancement." Journal of VLSI signal processing systems for signal, image and video technology, Vol. 38 (2004): P.35-44. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:VLSI.0000028532.53893.82>
5. O. V. Komenchuk and O. B. Mokin, "ANALYSIS OF PRE-PROCESSING METHODS OF PANORAMIC DENTAL X-RAY IMAGES FOR IMAGE SEGMENTATION PROBLEMS", Bulletin of the Ukrainian Institute of Dental Medicine. 2023. No. 5, pp. 41–49, <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/38640>
6. Romanyuk O. N., Pavlov, S. V., Bobko, O. L., Zavalnyuk, E. K., Reshetnik, O. O. (2024). Big data analysis in computer graphics. Optical-Electronic Information and Energy Technologies, 47(1), 50-57. <https://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/43075>
7. Mishra, Akshansh. "Contrast limited adaptive histogram equalization (CLAHE) approach for enhancement of the microstructures of friction stir welded joints." arXiv preprint arXiv:2109.00886 (2021). <https://arxiv.org/pdf/2109.00886>
8. Babyuk N. P., Pavlov S. V., Kolisnyk P. F., Lunin Ya. Features of computer analysis of biomedical images of conjunctival microcirculation. Optical-Electronic Information and Energy Technologies. 2021. No. 2: pp. 53-65. <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/36182>
9. OpenCV Team. (n.d.). OpenCV: Open Source Computer Vision Library. OpenCV. Retrieved March 26, 2025, from <https://opencv.org/>
10. Matplotlib Developers. (n.d.). Matplotlib Pyplot Tutorial. Matplotlib. Retrieved March 26, 2025, from <https://matplotlib.org/stable/tutorials/introductory/pyplot.html>
11. Dataset Ninja. Visualization Tools for High Resolution Fundus Dataset. Dataset Ninja; 2025. Accessed February 10, 2025. <https://datasetninja.com/high-resolution-fundus>

Надійшла до редакції 15.02.25 р.

АНДРІКЕВИЧ СЕРГІЙ АНАТОЛІЙОВИЧ – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: andrikevuch.serhii@gmail.com**

ТУЖАНСЬКИЙ СТАНІСЛАВ ЄВГЕНОВИЧ – к.т.н, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: slavat@vntu.edu.ua**

SERHII ANDRIKEVYCH, STANISLAV TUZHANSKYI

**IMPROVED METHOD OF ADAPTIVE HISTOGRAM EQUALIZATION FOR COLOR FUNDUS
IMAGES**

Vinnitsia National Technical University

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

UDC 004.75

S.V. KHRUSCHAK, O.M. TKACHENKO, I.S. KOLESNYK

RAG EFFICIENCY IMPROVEMENT FOR BUILDING INTELLECTUAL SCIENTIFIC KNOWLEDGE DATABASES

Vinnitsia national agrarian university, 21012, Sonyachna, 3, Vinnitsia, Ukraine

e-mail: sergey.khruschak@gmail.com

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsia, Ukraine, e-mail: iskolesnykcom@gmail.com

Анотація. В статті розглядається розробка інтелектуальної бази знань на основі наукових статей з використанням великих мовних моделей в режимі генерації доповненої пошуком. Досліджено різні методи підвищення релевантності вибірки цитованих джерел та згенерованих відповідей мовної моделі та вибір підходів до побудови мовних генеративних систем з врахуванням специфіки наукових матеріалів українською та англійською мовами. Також розглянуто використання різних мовних моделей для генерації відповідей. В процесі дослідження обрано набір критеріїв для комплексного оцінювання генеративних систем та надано рекомендації для побудови наукових інтелектуальних баз знань.

Розроблено інтелектуального агента, який дозволяє проводити пошук та аналізувати наукові статті у зручній інтерактивній формі з забезпеченням цитувань оригінальних документів.

Ключові слова: штучний інтелект, база знань, великі мовні моделі, LLM, генерація доповнена пошуком, RAG.

Abstract. The article describes the development of an intellectual knowledge base based on scientific articles using large language models in the mode of generation by augmented search. Various methods of increasing the relevance of the sample of cited sources and generated answers of the language model and the choice of approaches to building language generative systems taking into account the specifics of scientific materials in Ukrainian and English are investigated. The use of different language models for generating answers is also considered. In the course of the study, a set of criteria for a comprehensive evaluation of generative systems was selected and recommendations for building scientific intellectual knowledge bases were provided.

An intelligent agent has been developed that allows searching and analyzing scientific articles and providing document citations in a convenient interactive form.

Key words: artificial intelligence, large language models, LLM, retrieval augmented generation, RAG, knowledge base.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-89-97

INTRODUCTION

Retrieval-Augmented Generation (RAG) has emerged as a powerful approach, leveraging Large Language Models (LLMs) with external knowledge retrieval to significantly improve AI's ability to handle complex tasks requiring information and reasoning. By integrating external data, RAG enables generative models to produce more relevant and factually grounded responses with provided citations. That feature is particularly valuable in building robust knowledge bases for scientific research or internal corporate data.

However, real-world implementations of the RAG knowledge bases contain lots of ongoing challenges that can impact their practical application. Among them are management of noisy input data, retrieving of a proper context for the question, processing of multimodal information that contains images, formulas and table data. Finding a proper balance between accurate information retrieval and the adaptability of the generative model remains crucial for the overall performance and reliability of these systems [1].

© С.В. ХРУЩАК, О.М. ТКАЧЕНКО, І.С. КОЛЕСНИК 2025

This paper investigates methods for improving the efficiency of RAG frameworks specifically for the task of building and maintaining scientific knowledge bases, mainly focusing on strategies that enhance retrieval

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

quality and improve the integration of retrieved documents within the generation process. Through systematic experimentation and analysis, the study aims to provide insights and practical recommendations for designing RAG-enhanced knowledge management systems that are more scalable, accurate, and efficient.

The purpose of the article is to increase the relevance of the results of large language models when used in the retrieval augmented generation mode for multilanguage scientific articles. To achieve this goal, we need to solve the following tasks:

- to select a set of criteria to be used for evaluating the relevance of the results of large language model output;
- to improve the architecture of an RAG intelligent system adding full content retrieval of the related articles and re-ranking of the content;
- analyze impact of using different language models for the answer generation.

ANALYSIS OF RAG-BASED INTELLIGENT SYSTEMS

Large Language Models (LLMs) are a class of advanced neural network architectures, typically characterized by their substantial depth and extensive parameter counts and usually trained on a vast corpora of unlabeled textual data. This large-scale pre-training enables prominent LLMs, including GPT-series, PaLM, LLaMA, and Claude, among others, to develop a sophisticated understanding of linguistic patterns, semantic relationships, and contextual nuances of human texts. Core functional applications of LLMs encompass text and source code generation, the engineering of intelligent conversational agents, the description of visual information, and the detection of anomalies within complex datasets. The versatility of these models has fostered their widespread integration across various applied domains, including the development of adaptive educational platforms, the creation of sophisticated financial instruments, and their utility as analytical assistants in scientific research, particularly for tasks like literature review and data interpretation [2].

Despite their significant potential and demonstrated efficiency, LLMs possess inherent limitations that necessitate careful considerations of their usage. A primary constraint is the substantial computational expenditure required for their training and inference. Furthermore, practical implementations often impose restrictions on the input query length (token limits), which can curtail the complexity of prompts or the volume of contextual information provided [3]. A notable challenge arises when LLMs encounter queries related to highly specialized or niche domains underrepresented in their initial training corpora. This can lead to a substantial degradation in output accuracy and relevance. Models may also exhibit a tendency towards overgeneralization, resulting in responses that, while fluent and looks plausible, lack precision or contain many terminological inaccuracies. Another aspect is that the knowledge encoded within LLMs is inherently static and reflects the temporal horizon of their last training dataset, leading to potential obsolescence as new information emerges, while the cost and time intensity of retraining impede frequent updates. A critical and widely discussed issue is the phenomenon of "hallucinations," wherein the model generates plausible sounding, but totally incorrect or unsubstantiated information, likely stemming from the model's internal mechanisms for pattern completion rather than genuine comprehension or data retrieval [4]. Additionally, LLMs typically lack the capability to provide accurate citations or attribute information to specific sources, which makes them harder to use in scientific and academic contexts where verifiable provenance is paramount.

To address these limitations and enhance the reliability and accuracy of LLM outputs, various techniques are actively used. Those include sophisticated prompt engineering strategies designed to guide the model's focus and constrain its output space, targeted fine-tuning of pre-trained models on domain-specific datasets to saturate model with specialized knowledge, and the integration of LLMs with external knowledge bases or live data retrieval systems. Among these, architectural approaches centered on retrieval augmented generation (RAG) have emerged as particularly effective. This method combines the information retrieval capabilities of dedicated search systems with the generative capabilities of LLMs. By grounding the generation process in relevant, retrieved documents, this method aims to substantially reduce the tendency for hallucinations, improve the factual accuracy of responses, and enhance the overall trustworthiness of LLM-generated content by providing information sources, thereby mitigating some of the most pressing challenges associated with these powerful models [5].

The basic idea of RAG is that before synthesizing a response it involves a preparatory information retrieval step from an external knowledge repository (a vector database or indexed document store). The task of the RAG system is to identify and retrieve information chunks that are most relevant to the input query and the current context. This retrieved contextual data is subsequently provided as an input to the LLM, which then instructed to formulate an answer explicitly grounded in this supplementary information. This methodology significantly mitigates the occurrence of "hallucinations" or the generation of unsubstantiated content, thereby

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

enhancing the factual accuracy and depth of the output. Moreover, it inherently supports the capacity to provide citations and references to the source documents, thereby enabling verification of the generated results [6].

There are various implementations of RAG systems, but most usually they consist of following elements: a storage preparation and vectorization unit, a retrieval unit that uses vector similarity search or hybrid methods that combine semantic and keyword search to find relevant information to a question in the store, and a context generation unit where the received pieces of information are selected, prepared and transferred to a language model for generating an answer.

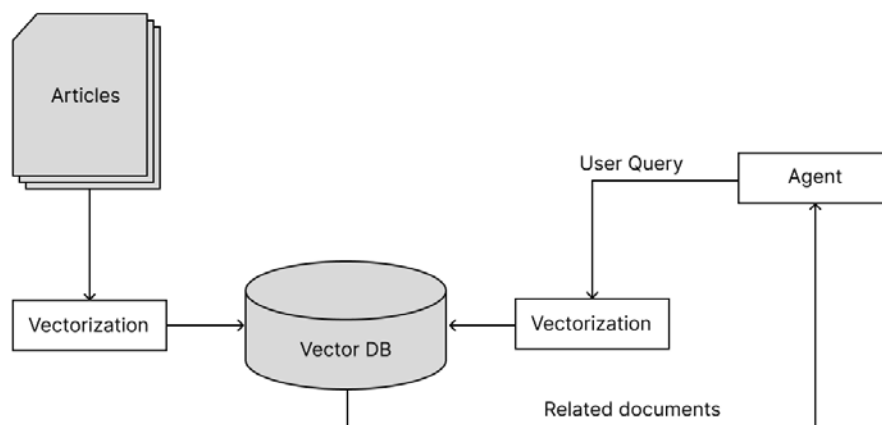


Figure 1 – Basic RAG system diagram

For storing the vectorized documents usually any of specialized vector databases like Chroma, QDrant or Pinecore are used [7]. Also many modern relational and NoSQL databases actively adding vector operations and storage support, among them PostgreSQL, MongoDB and others. These databases are used to store not only the primary data, but also metadata and document's corresponding vector representations, commonly referred to as embeddings. These embeddings, generated by distinct machine learning models, encapsulate the semantic essence of the source data. The utilization of such vector representations facilitates efficient similarity searches, enabling the rapid identification of records that are semantically close to a given query. A common preprocessing step involves the segmentation of text documents into smaller, often overlapping, chunks prior to their ingestion into the vector database. This chunking strategy aims to enhance the granularity of the retrieval process, thereby increasing the likelihood of surfacing the most relevant information segments in response to a query. Subsequently, during the retrieval phase, when records semantically relative to the user's query are identified, a standard practice is to select the top-k results. These selected segments are then integrated into the context window of a large language model to narrow its response generation.

However, despite the considerable promise of Retrieval Augmented Generation (RAG) systems to enhance the reliability and contextual relevance of generated text, their practical implementation is frequently accompanied by several challenges. Among these, the retrieval process often finds non-relevant or sub-optimal text fragments from the vector stores. Also, many conventional RAG architectures unable to process non-textual information, such as charts, diagrams, and figures, which are often crucial for comprehensive understanding [6]. These limitations are especially acute when working with scientific information, which usually have a complex structure, rich terminology and frequently rely on visual elements.

This research addresses the development and systematic evaluation of an intelligent knowledge base, based on a RAG framework, specifically considering interactions with the academical data. The input dataset for this study comprises 105 scientific technical articles published. The articles come in multiple languages, rich with visual information and math. The proposed system incorporates several enhancements to improve retrieval and generation phases of the system, including the integration of computer vision techniques for the extraction and interpretation of graphical materials, a preliminary document categorization and re-ranking. These integrated approaches are designed to improve the relevance and correctness of responses generated by large language models when answering field related questions. The efficacy of the developed system was assessed at each stage of its development and implementation.

EVALUATION OF THE DEVELOPED SYSTEM

Before doing any changes to the system, it is important part to choose the criteria and methods used to evaluate them. The main criterion in this paper is the relevance and completeness of the model's answers to questions related to scientific articles in the database.

First let's consider the retrieval step, the primary objective of it is to ensure that the documents or fragments selected are semantically aligned with the query intent. To quantify retrieval performance, the following similarity metrics were employed: for queries with known relevant documents (established via ground-truth datasets), we calculated the recall at top-k retrieved results, the metric then assessed how often the correct or most relevant documents were successfully retrieved within the top k candidates. This metric is called Mean Reciprocal Rank (MRR) and usually is used to evaluate the ranking quality by considering the position of the first relevant retrieved item. A higher MRR score suggested that relevant documents appeared earlier in the retrieval list, minimizing the search burden on the generation model. Also to ensure that categorization enhanced retrieval precision, we measured the consistency between the predicted category of the query and the categories of retrieved documents. High categorization consistency correlated with improved retrieval quality and generation relevance [8].

For automated performance evaluation of the language model answer generation, two classes of metrics are usually used: metrics based on ground truth, which evaluate the similarity of the generated system response to the reference answer, and metrics without ground truth (zero-reference), when there is no reference answer and the relevance, logic, or factuality of the response is checked.

One of the popular metrics that is used to compare the semantic similarity of the model's response with the ground truth is embedding based metric. Embedding models are trained on a very large corpus of text itself, so their similarity results quite well align with human perception. In our case a cosine distance between the calculated embedding vectors, obtained from OpenAI service was used. The formula for the reference (V_e) and the generated (V_g) answer vectors in this case is:

$$Sim(V_e, V_g) = \frac{\vec{V_e} \cdot \vec{V_g}}{\|V_e\| \cdot \|V_g\|} \quad (1)$$

Additionally, we used LLM evaluation metrics, in which the model receives both texts as input and is tasked with evaluating their similarity based on various criteria: relevance, truthfulness, style and completeness. To cover evaluation methods without a basic truth, the language model perplexity scores (MP-PPL) were used. This value indicates of how confidently the model is able to predict the sequence of words, the higher the confusion, the less confident the model is in predicting the observed sequence. It is computed by the formula:

$$Ppl = \exp \left(- \sum_{i=1}^t \log \left(P_{\theta}(x_i | x_j \neq x_i) \right) \right), \quad (2)$$

where P_{θ} is the logarithm of the probability of the i -th output token of the model, provided that other tokens appear in the sentence [8]. And the last approach that was used for model evaluation is to use another LLM to evaluate the completeness and relevance of the answer given only question and the answer [9].

To obtain a ground truth answers for evaluation a random set of articles was picked and 60 questions were manually generated on the material, both specific to a single article and covering information from several articles and graphical information. Since the volume of articles and the number of meta-parameters and components are quite significant, it was important to automate the testing process so it can be easily run on every iteration. Therefore, the proposed evaluation methods were implemented in code and integrated with the LangGraph service, that provides tracing and evaluation capabilities.

DEVELOPMENT OF A MULTIMODAL RAG SYSTEM WITH RE-RANKING

The intelligent system can be divided into two main, relatively independent modules: uploading and processing. The module for parsing and uploading articles to the vector storage is triggered only when documents are initially uploaded or updated. For improving that part it is proposed to add images and diagrams recognition to the ingestion step with additional pre-processing needed for later steps: extracting keywords, short description, and category of the article. The processing phase in turn can be split into two major phases: context retrieval and answer generation, it is possible to improve and measure them separately as well by adding categorization and re-ranking. The proposed updated architecture is presented on the Figure 2.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Let us consider the main elements of the subsystem for processing and uploading documents to the system. Before being uploaded to the vector store, documents undergo preliminary processing, where parts that are not directly related to the article are removed: title pages, information about the journal, table of contents, etc. After that, they are divided into separate categories; if there are keywords present in the article they are extracted, otherwise the category is determined using the GPT-4o mini model with instructions for determining categories based on the text of the article. The resulting categories, keywords, and links to document related to the same article are added as metadata to the corresponding records in the vector repository and are further used to improve search relevance.

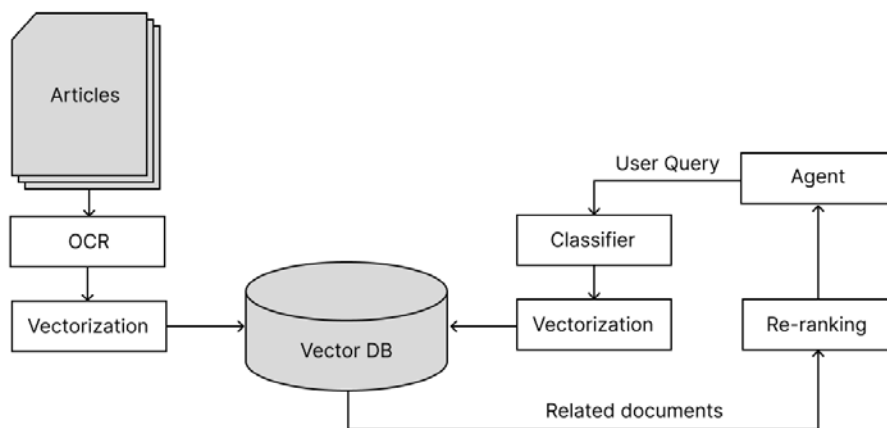


Figure 2 – Proposed RAG system architecture diagram

Categorization plays a central role in improving retrieval efficiency and generation relevance as it enables segmented retrieval, where queries are first routed to the most semantically appropriate category before similarity search is performed. By narrowing the search space, categorization can significantly reduce retrieval noise and computational cost, while simultaneously improving the precision of the retrieved contexts.

After categorized retrieval of the related documents it is proposed to re-rank them based on keywords, which are usually provided in the articles or can be obtained using a separate LLM pre-processing step. For implementing re-ranking step a BM25 method is used [10]. As an input it gets documents and keywords retrieved from the vector storage along with other parts related to the same articles and evaluates the retrieved passages based on term frequency and document length normalization to assign more accurate relevance scores. Additionally, it is proposed to store generalized descriptions generated by the LLM during articles loading step, with links to original documents separately, which allows better contextualization of answers to general questions on the topic, that needs to fit multiple articles into the LLM context window. The resulting summarized information about all articles is added separately to the vector storage and linked with other information from the document using metadata. As an optimization, the summarization, categorization and keywords retrieval blocks are combined into a single LLM processing step, which allows getting all values in one pass of the model.

As the primary focus of the developed system is the processing of scientific texts, the proposed architecture adds image and diagram recognition and their conversion into textual descriptions [11]. This can be done only once per document in the pre-processing step using any language model with image recognition support, our tests shown that gpt-4o multimodal model gives the best results for the task. The resulting textual description of the image data then added to the main text of the article. The last step before uploading documents is to split the texts of articles into separate overlapping blocks, convert them to vector representation, and upload them to a vector database. At the same time, all previously obtained information is added to the metadata of the documents, which allows the system to select other parts of the document based on a single found record.

During the main operation of the system, the incoming question goes through a chain of processors that fill it with additional information. First, the previously stored history of interactions with the agent is retrieved, which improves understanding of the question context by the system. Since the context of language models is limited, and older history is less important than relevant documents, the received history is truncated to 1000 tokens. Further, the question and interaction history is classified using the list of categories determined during the upload phase, that allows to narrow down the search and thus increase the relevance of the results found. If the categories cannot be determined, the search will be performed on the entire articles dataset. The question

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

category is determined using the gpt-4o-mini model, even though Gemini model was tested as well, receiving similar results. The next step is to search for relevant documents in the vector repository. The search for documents is performed by finding the documents that have the smallest cosine distance between the embedding vectors to the question embedding.

For testing the proposed RAG-system a modular prototype using widely adopted tools and frameworks was implemented: a set of Jupyter notebooks were used for development and experimentation, LangChain framework for pipeline orchestration, FAISS was used as the local vector storage for context retrieval, and LangSmith for detailed tracing and observability. A total of 107 articles in PDF format were downloaded from the journals of Vinnytsia National Technical University and processed by the system. Many articles contained additional information about the journal, authors positions, etc. so they were passed through the pre-processing step to clean up all the irrelevant information. The LangChain library provides a set of tools, like PyPDFLoader, which were used to process and vectorize the PDF documents page by page, or LLMImageBlobParser that allowed to plug in different multimodal LLM models for image recognition during pre-processing step. Since language models produce data in an arbitrary format, to ensure a predictable structured result, OpenAI's integration with Pydantic and LangChain tools was used, which allowed to parse the model's output and return it in the form of a Python object of the required structure. When processing queries, the MemorySaver class, provided by the LangChain library, was used to save and load the message history.

After that, the texts are classified and divided into smaller fragments of 1000 tokens with an overlap of 200 tokens between fragments. Each text fragment is then converted into a vector in a multidimensional space using the OpenAIEmbeddings embedding model. The dimension of vectors for this model is 1536. These vectors describe the content of the fragments and allowed to calculate the similarity between the user's query and the parts of the corpus. After that, the obtained vector representations of articles and summarized information along with metadata were added to the FAISS index. The article metadata included file names for providing links to sources, defined article categories, keywords and neighbouring text fragments. The query category is determined based on both the current question and the historical context, for which the gpt-4o model with a set of instructions for determining the category is used. All new information received is added to the main question at each stage of its passage through the processing chain. To facilitate system testing, an interactive agent built into Jupyter was created using the Gradio component library, which allows testing the system with different handler settings and display intermediate search results. The use of interactive chat allowed customizing the meta-parameters of document sampling and classification and test the system's performance on the go.

As a result, the developed system allows analyzing uploaded scientific articles and formulating generalized conclusions about individual articles or topics in general, providing citations for generated answers. The architecture is designed in such a way that most components can be replaced or excluded from the system, which allows for a better assessment of the impact of each change on the overall system performance.

The LangSmith framework was used as a framework for testing and monitoring experiments. This framework allows to obtain detailed execution traces, capturing every step of the retrieval and generation process from query classification to retrieval selection and final generation, as well as each pipeline component's inputs and outputs. The framework also allows to capture retrieval times, generation delays, and categorization accuracy enabling more precise tuning of the specific parts of the system. The ground truth questions were uploaded as a dataset to LangSmith and used to first evaluate the retrieval phase of the system using MRR metrics, the results of the evaluation are shown in Figure 3.

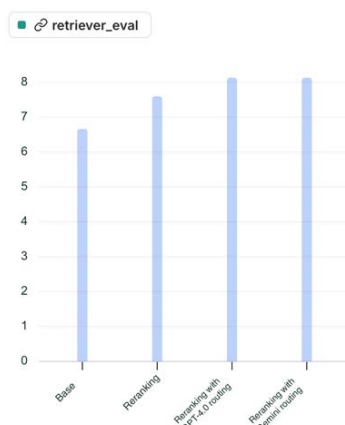


Figure 3 – Retrieval step evaluation results using MRR

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

MRR evaluation results show how good on average system in finding the correct chunk of text related to the ground truth questions. Each test was repeated at least 3 times and results represents the average value. For the base case of retrieval that obtains top 3 related documents from the vector storage the result is 6.64 points on average. Adding retrieval of the other parts of the same article with re-ranking step allows to improve the result to 7.60 and addition of the classification block with routing allowed to improve the result further to 8.13. The classification step is performed by the LLM, but the task is very simple, so using both GPT4.0 and Gemini for the classification shown similar results on average.

The next step was evaluating the final results of the LLM answers generation on different improvement stages and using different LLMs. The evaluation results are presented on the Fig. 4. The paper considers only the best average results after hyperparameters and prompts tuning using two different LLMs: GPT4.0 and Gemini. All of these metrics operate on the principle that the higher the value, the better the response quality.

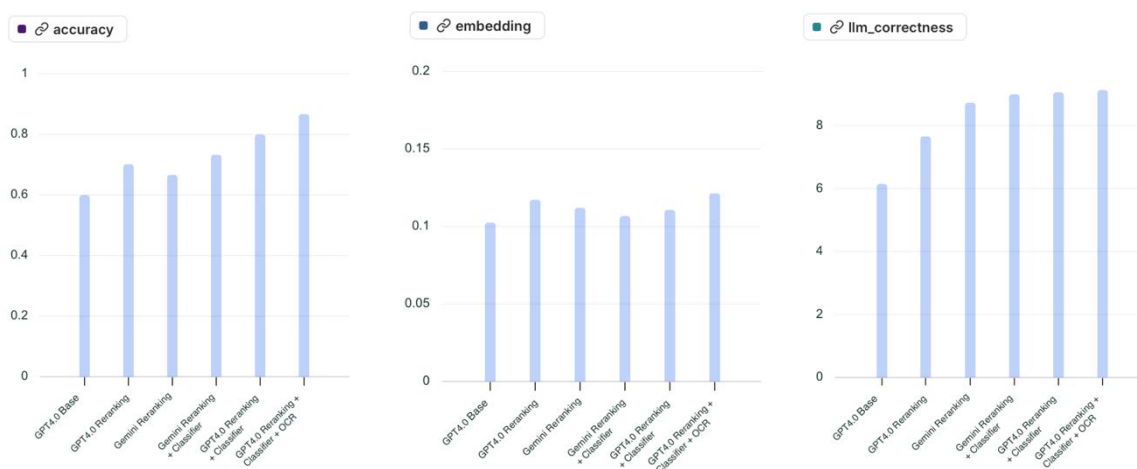


Figure 4 – System evaluation results using different metrics

The major variants that were considered on the graph are: base model – the basic RAG architecture based on GPT-4.0 model, model with added articles re-ranking, model with re-ranking and categorization and the final variant that adds images OCR data to the vector storage. The metrics that are displayed are: accuracy – comparison of the reference and the generated answer using another LLM, embeddings distance – the average value of the cosine distance between the embedding vectors for the model response and the reference response, and an assessment of the answer by the other LLM model (GPT 4.0), with instructions provided to check the relevance and accuracy of the answer without specifying a reference answer. The results are also presented in the Table 1.

Table 1

Model evaluation results

Metrics	GPT4.0 base model	GPT4.0 with re-ranking	Gemini with re-ranking	GPT4.0 with re-ranking and classifier	Gemini with re-ranking and classifier	Final GPT4.0 model with added image recognition
Accuracy	0,6	0,70	0,67	0,73	0,80	0,87
Embedding	0,105	0,134	0,124	0,113	0,120	0,143
LLM correctness	6,15	7,67	8,53	8,87	9,00	9,11

As can be seen from the testing results, each architecture improvement has a positive impact on system accuracy, with re-ranking being the most impactful. On the other hand, image recognition feature adds quite little on top of the existing changes, which also can be caused by the limited number of ground truth questions that rely solely on the data from images. As for the models GPT4.0 shows slightly better results in most metrics,

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

compared to Gemini, so it was chosen for the final system variant. At the same time, the request processing time increased from 3,9 for the base system to 7,4 seconds, which is acceptable for systems of this type. Thus, the architecture is effective from a practical point of view and demonstrates the relevance of responses and stability in various usage scenarios.

CONCLUSIONS

In this article, an improved architecture of an intelligent system based on retrieval augmented generation, focused on working with scientific information in both Ukrainian and English, was developed and implemented. The system integrates the capabilities of large language models with mechanisms for categorization, generalization and processing of graphic information of loaded documents. A set of metrics was analyzed and selected, by which the system was evaluated, and a series of experiments were conducted for a comprehensive assessment of each introduced architectural change. The results demonstrate an increase in the relevance of responses compared to basic generation approach. At the same time, each new element of the system provides computational complexity and time for processing system requests.

Therefore, the proposed system can be used as a basis for creating intelligent knowledge bases in education institutions, as well as for the further development of language generative systems adapted to the specifics of scientific texts in Ukrainian and English.

One of the directions of further research can be the use of special models for working with scientific articles, such as, for example, MathCoder, instead of general-purpose language models. Using external re-ranking services that allows to further improve the context used for answer generation. As well as using the MCP protocol to integrate external knowledge systems and utilities.

REFERENCES

1. Andriopoulos, K. and Johan, P. (2023). Augmenting LLMs with knowledge: a survey on hallucination prevention. arXiv. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.16459>.
2. Wang, Chenguang, Mu Li, and Alexander J. Smola. Language models with transformers. arXiv preprint arXiv:1904.09408 (2019). URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1904.09408>.
3. Jeong, Cheonsu (2023). A study on the implementation of generative AI services using an enterprise data-based LLM application architecture. arXiv. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2309>.
4. Brown, T., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J.D., Dhariwal, P. and Neelakantan, A. (2020). Language models are few-shot learners. Advances in Neural Information Processing Systems 33, 1877–1901. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2005.14165>.
5. Cui, J., Li, Z., Yan, Y., Chen, B. and Yuan, L. (2023). ChatLaw: open-source legal large language model with integrated external knowledge bases. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2306.16092>.
6. Tolga Şakar, Hakan Emekci, Maximizing RAG efficiency: A comparative analysis of RAG methods / Natural Language Processing, Cambridge, Vol. 31, Issue 1, 2025, pp. 1-25.
7. Toni Taipalus. Vector database management systems: Fundamental concepts, use-cases, and current challenges / Cognitive Systems Research, Vol. 85, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2024.101216>.
8. Roucher A. RAG Evaluation. URL: https://huggingface.co/learn/cookbook/rag_evaluation.
9. Herreros Q., Veasey T., Papaoikonomou T. RAG evaluation metrics: A journey through metrics. URL: <https://www.elastic.co/search-labs/blog/evaluating-rag-metrics>.
10. Trotman A., Puurula A., Burgess B.. Improvements to BM25 and Language Models Examined. In Proc., 19th Australasian Document Computing Symp., ADCS '14, 58–65. New York: Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/2682862.2682863>.
11. Romanyuk, O., Zavalniuk, Y., Pavlov, S., etc. New surface reflectance model with the combination of two cubic functions usage, *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska*, 2023, 13(3), pp. 101–106
12. Chen, W., Chen, J., Zou, F., Li, Y.-F., Lu, P. and Zhao, W. (2019). RobustIQ: a robust ANN search method for billion-scale similarity search on GPUs. Proceedings of the 2019 International Conference On Multimedia Retrieval (pp. 132–140). URL: <https://doi.org/10.1145/3323873.3325018>.

Надійшла до редакції 24.03.2025 р.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

KHRUSCHAK SERGII – Ph. D., Senior Teacher of Computer Sciences and Digital Economics Department, Vinnytsia national agrarian university, Vinnytsia, Ukraine, *e-mail: sergey.khruschak@gmail.com*

TKACHENKO OLEXANDR – Ph. D., assistant professor of Software Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, *e-mail: alextk1960@gmail.com*

KOLESNYK IRYNA – Ph. D., assistant professor of Computing Technology Department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine, *e-mail: iskolesnykcom@gmail.com*

С.В. ХРУЩАК, О.М. ТКАЧЕНКО, І.С. КОЛЕСНИК

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ RAG ДЛЯ ПОБУДОВИ НАУКОВИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ БАЗ ЗНАНЬ

Вінницький національний аграрний університет, Сонячна 3, м. Вінниця, Україна
Вінницький національний технічний університет, Україна

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 004.8, 004.9

Д.І. УГРИН, Ю.О. УШЕНКО, Т.В. ТЕРЛЕЦЬКИЙ, О.Л. КАЙДИК,
Ю.Г. ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ, К.С. ШКІДІНА

ГНУЧКА ТЕХНОЛОГІЯ РОЗРОБКИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ НАСЕЛЕННЯ

*Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича
Луцький національний технічний університет*

Анотація. Стаття присвячена розробці інтелектуальної системи прогнозування розвитку населення, яка використовує методи машинного навчання для аналізу історичних демографічних даних. У роботі розглядаються сучасні виклики демографічного розвитку, які вимагають точного прогнозування чисельності населення для ефективного стратегічного планування. У статті представлено опис методів демографічного прогнозування, формалізацію та математичні моделі, такі як лінійна та поліноміальна регресія, а також інші моделі, що можуть бути використані для прогнозування. Розроблено модуль генерації моделей машинного навчання, що автоматизує процес побудови прогнозних моделей на основі історичних демографічних даних. Реалізовано функціонал попередньої обробки даних, включаючи автоматичне заповнення пропущених значень, нормалізацію даних та виявлення аномалій. Проведено вибір та інтеграцію алгоритмів машинного навчання, оцінку якості та оптимізацію моделей, а також забезпечено можливість перенавчання моделей. Розроблено інтерфейс для інтеграції з іншими інформаційними системами. Отримані результати демонструють гнучкість та ефективність запропонованого підходу та можливість його використання у сфері стратегічного планування соціально-економічного розвитку.

Ключові слова: аналіз даних, стратегічне планування та прогнозування даних, демографічні дані, прийняття рішень, машинне навчання.

Abstract. The article is devoted to the development of an intelligent population forecasting system that uses machine learning methods to analyze historical demographic data. The paper considers modern challenges of demographic development that require accurate population forecasting for effective strategic planning. The article presents a description of demographic forecasting methods, formalization and mathematical models, such as linear and polynomial regression, as well as other models that can be used for forecasting. A machine learning model generation module has been developed that automates the process of building forecasting models based on historical demographic data. Data preprocessing functionality has been implemented, including automatic filling of missing values, data normalization and anomaly detection. Machine learning algorithms have been selected and integrated, quality assessment and model optimization have been carried out, and the possibility of retraining models has been provided. An interface for integration with other information systems has been developed. The results obtained demonstrate the flexibility and effectiveness of the proposed approach and the possibility of its use in the field of strategic planning of socio-economic development.

Keywords: data analysis, strategic planning and data forecasting, demographic data, decision making, machine learning.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-98-110

ВСТУП

Актуальність розробки гнучкої технології інтелектуальної системи прогнозування розвитку населення обумовлена рядом ключових факторів, які відповідають сучасним викликам у сфері демографічного планування та соціально-економічного розвитку [1, 2]. В сучасному світі спостерігаються динамічні зміни демографічних показників, таких як зростання чисельності населення, урбанізація, старіння суспільства та міграційні процеси [3]. Ці тенденції створюють значні виклики для урядів, організацій та підприємств, які потребують точного планування використання ресурсів, інфраструктурного розвитку та надання соціальних послуг [4].

Застосування технологій машинного навчання для аналізу демографічних даних відкриває нові перспективи у прогнозуванні змін населення [5]. Сучасні моделі машинного навчання здатні аналізувати великі обсяги даних та враховувати різноманітні фактори, такі як економічні показники, рівень народжуваності, смертність, міграційні потоки, рівень освіти та інші [6]. Це дозволяє створювати точні та адаптивні моделі прогнозування, які враховують динаміку змін у конкретних регіонах чи країнах [7].

© Д.І. УГРИН, Ю.О. УШЕНКО, Т.В. ТЕРЛЕЦЬКИЙ, О.Л. КАЙДИК, Ю.Г. ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ, К.С. ШКІДІНА, 2025

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Розробка інтелектуальних систем прогнозування є особливо актуальною в умовах, коли держави потребують швидкої адаптації до змінюваних умов, зокрема для забезпечення продовольчої безпеки, розвитку інфраструктури, освітніх та медичних послуг [8]. Використання таких систем дозволяє урядам і бізнесу ухвалювати стратегічно важливі рішення, мінімізуючи ризики ресурсного дефіциту чи надлишкових витрат [9].

Подальший розвиток технологій аналізу даних, зростання обчислювальних потужностей та доступність відкритих демографічних баз даних роблять подібні рішення практичними й ефективними для широкого використання [10]. Інтелектуальні системи прогнозування стають важливим інструментом для досягнення цілей сталого розвитку, визначених ООН [11].

Отже, розробка інтелектуальної системи прогнозування розвитку населення є надзвичайно актуальною темою, що сприяє покращенню управління ресурсами, соціально-економічному плануванню та забезпеченню стабільності в суспільстві. Використання машинного навчання для цієї мети підвищує точність прогнозів, оптимізує прийняття рішень і підтримує сталий розвиток країн.

Метою даного дослідження є розробка гнучкої технології розробки інтелектуальної системи прогнозування розвитку населення на основі моделей машинного навчання для прогнозування розвитку населення.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛОГІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

Прогнозування чисельності населення є ключовим елементом стратегічного планування та розробки політик на локальному, національному та глобальному рівнях [10, 11]. У сучасному світі, де демографічні тенденції швидко змінюються, точні прогнози стають необхідними для ефективного розподілу ресурсів, управління ризиками та адаптації до майбутніх викликів. Демографічні зміни впливають на широкий спектр суспільних сфер, включаючи економіку [14], охорону здоров'я, освіту, міське планування та екологію.

Точне прогнозування чисельності населення дозволяє урядам, організаціям та дослідникам краще розуміти майбутні демографічні тенденції та планувати відповідні заходи. Це допомагає запобігти кризам, пов'язаним із перенаселенням або демографічною депресією [7], а також ефективно реагувати на виклики, що пов'язані зі старінням населення, міграцією та іншими демографічними процесами [9].

Розробка ефективних систем прогнозування чисельності населення вимагає використання сучасних технологій, зокрема методів машинного навчання [13]. Ці технології дозволяють аналізувати великі обсяги даних, виявляти складні закономірності та підвищувати точність прогнозів [12]. Інтеграція результатів у зручний графічний інтерфейс забезпечує доступність та зручність використання системи для широкого кола користувачів.

На ринку існує ряд програмних застосунків та інструментів для аналізу демографічних даних та прогнозування чисельності населення. Ці інструменти використовують різні статистичні методи та алгоритми машинного навчання, що дозволяє досягати високої точності прогнозів.

Проведемо аналіз існуючих найпопулярніших інструментів:

1. World Population Prospects (WPP) – офіційний інструмент ООН, що надає доступ до глобальних демографічних даних та прогнозів (рисунк 1) [17].

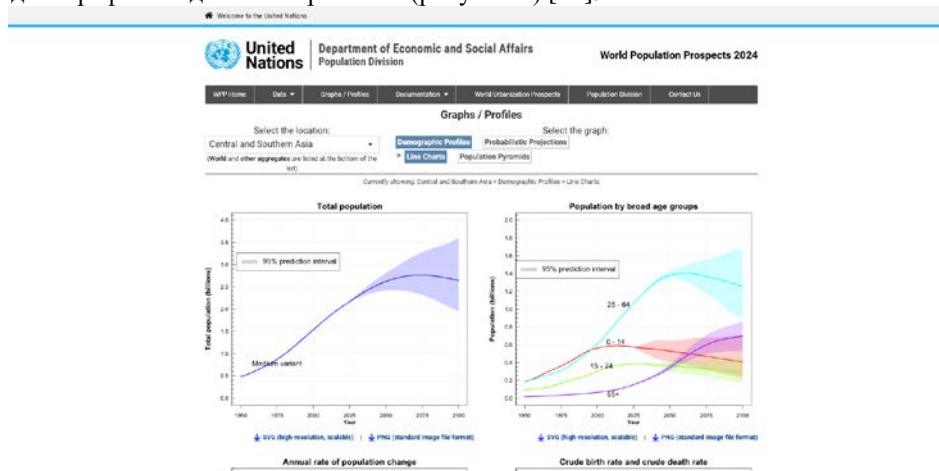
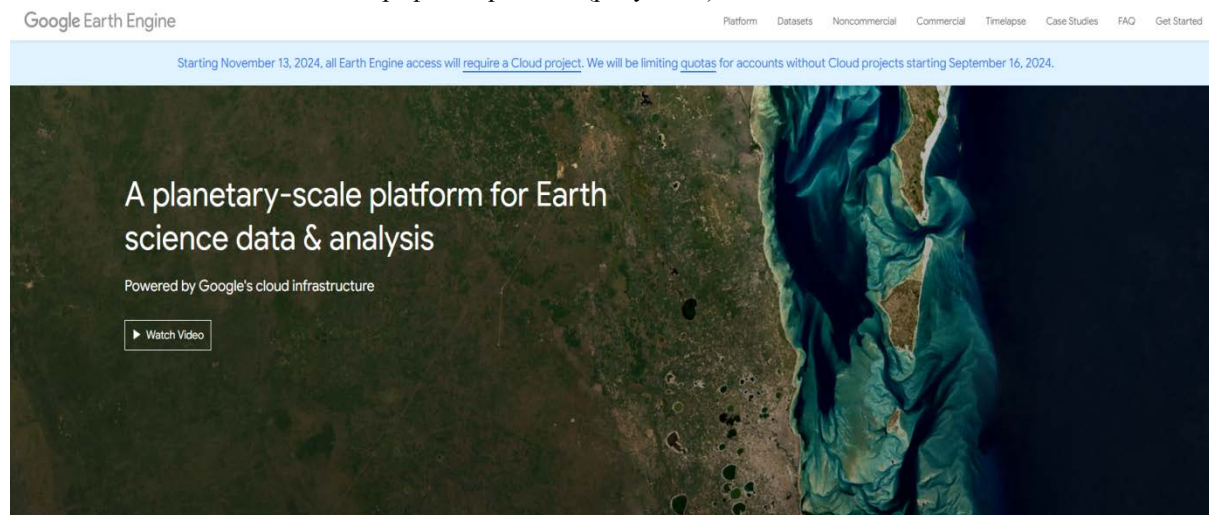


Рисунок 1 – World Population Prospects (WPP)

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

WPP включає показники народжуваності, смертності та міграції. Регулярно оновлюється та використовується для наукових досліджень та планування на рівні урядів. Орієнтований на міжнародні організації, дослідників та уряди, але має обмежені можливості для налаштування моделей. Візуальний інтерфейс дозволяє аналізувати тренди, але не інтегрується з автоматизованими алгоритмами машинного навчання для персоналізованих прогнозів.

2. Google Earth Engine (GEE) надає доступ до глобальних геопросторових даних та можливості моделювання, включаючи демографічні прогнози (рисунок 2) [2].



Meet Earth Engine

Google Earth Engine combines a multi-petabyte catalog of satellite imagery and geospatial datasets with planetary-scale analysis capabilities. Scientists, researchers, and developers use Earth Engine to detect changes, map trends, and quantify differences on the Earth's surface. Earth Engine is now available for commercial use, and remains free for academic and research use.

Рисунок 2 – Google Earth Engine (GEE)

GEE інтегрується зі статистичними даними про населення, такими як Global Human Settlement Layer (GHSL). Дозволяє створювати візуалізації прогнозів чисельності населення. Вимагає технічних знань та навичок програмування на JavaScript або Python. Більше підходить для дослідників з технічними знаннями.

3. Tableau Public – використовується для візуалізації та аналізу даних, включаючи демографічні показники (рисунок 3) [3].

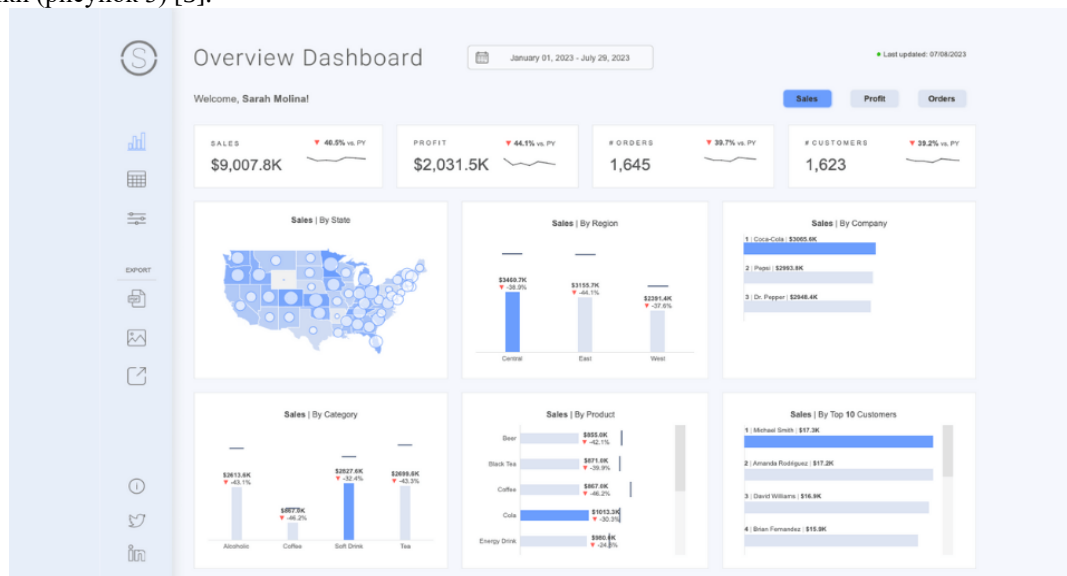


Рисунок 3 – Tableau Public

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Tableau Public дозволяє завантажувати набори даних, будувати інтерактивні графіки та створювати прогнози на основі історичних даних. Легко адаптується під конкретні потреби, але обмежений можливостями статистичних методів без інтеграції складних моделей машинного навчання.

Технологія розробки інтелектуальної системи прогнозування розвитку населення зосереджується на інтеграції алгоритмів машинного навчання для прогнозування чисельності населення [13]. Основні її переваги:

1. Використання лінійної та поліноміальної регресії для побудови моделей прогнозування [12].
2. Автоматизація збору, підготовки даних та генерації прогнозів.
3. Можливість налаштування під конкретні демографічні дані різних країн або регіонів.
4. Використання додаткових моделей машинного навчання для збільшення точності прогнозування [13].
5. Розроблена система має перевагу в доступності для широкого кола користувачів, гнучкості налаштувань та орієнтованості на вирішення задачі прогнозування чисельності населення з урахуванням сучасних вимог аналітики та прогнозування [15].

Огляд літератури та аналогії досліджень показують, що прогнозування чисельності населення є важливим інструментом стратегічного планування на всіх рівнях управління. Точність прогнозів є необхідною для ефективного розподілу ресурсів, вирішення демографічних проблем, таких як старіння населення, перенаселення та міграція. Сучасні методи прогнозування, зокрема використання машинного навчання, дозволяють підвищити точність та автоматизувати процеси збору і аналізу даних.

Існуючі інструменти, такі як World Population Prospects, Google Earth Engine та Tableau Public, надають різні можливості для аналізу демографічних даних, але мають свої обмеження щодо налаштувань та інтеграції зі складними моделями машинного навчання. Розробка інтелектуальних систем прогнозування, що використовують регресійні моделі та інші алгоритми машинного навчання, дозволяє значно підвищити точність і гнучкість таких прогнозів, а також забезпечує доступність для широкого кола користувачів.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА КЛЮЧОВІ АСПЕКТИ

Постановка проблеми. Сучасні виклики демографічного розвитку вимагають від урядів, регіональних адміністрацій та міжнародних організацій ефективних інструментів для стратегічного планування та управління ресурсами. Необхідність точного прогнозування чисельності населення стає критично важливою для прийняття обґрунтованих рішень у таких сферах, як охорона здоров'я, освіта, соціальне забезпечення, міське планування та економіка. Існуючі методи прогнозування часто не враховують складність та динамічність демографічних процесів, що призводить до неточностей та обмежень у їх застосуванні.

Мета дослідження. Розробка інтелектуальної системи прогнозування розвитку населення, яка забезпечить високу точність прогнозів на основі методів машинного навчання, автоматизує процес моделювання та надасть зручний інтерфейс для інтеграції з існуючими інформаційними системами.

Таким чином, завданням статті є:

1. Опис та дослідження методів демографічного розвитку, формалізації та математичних моделей.
2. Розробка модуля генерації моделей машинного навчання:
 - Автоматизація процесу побудови прогнозних моделей на основі історичних демографічних даних (народжуваність, смертність, міграція тощо).
 - Забезпечення можливості прогнозування на різні часові горизонти (короткострокові, середньострокові, довгострокові).
3. Реалізація функціоналу попередньої обробки даних:
 - Автоматичне заповнення пропущених значень, нормалізація даних та виявлення аномалій.
 - Агрегація даних за різними критеріями (регіони, вікові групи, стать).
4. Вибір та інтеграція алгоритмів машинного навчання:
 - Застосування лінійної та поліноміальної регресії, деревоподібних моделей (Random Forest, Gradient Boosting) та інших методів.
 - Забезпечення можливості розширення набору алгоритмів для адаптації до різних типів даних та завдань.
5. Оцінка якості та оптимізація моделей:

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

- Використання метрик RMSE, MAE, R^2 для оцінки точності прогнозів.
 - Застосування крос-валідації для оцінки стабільності моделей.
 - Автоматичний вибір найкращої моделі та підбір гіперпараметрів для оптимізації точності.
6. Забезпечення можливості перенавчання моделей:
- Регулярне оновлення моделей на основі нових демографічних даних.
 - Підтримка автоматичного перенавчання із заданою періодичністю (щоквартально, щорічно).
7. Розробка інтерфейсу інтеграції:
- Створення інтерфейсу для інтеграції з іншими інформаційними системами (системи управління даними, аналітичні платформи).
 - Автоматичне оновлення прогнозних значень у відповідних базах даних.
- На основі постановки та мети дослідження отримані ключові аспекти:
1. Точність прогнозів – забезпечення високої точності прогнозування чисельності населення для ефективного стратегічного планування.
 2. Автоматизація. Максимальна автоматизація процесів моделювання, обробки даних та оцінки якості.
 3. Адаптивність. Можливість адаптації системи до змін у демографічних даних та тенденціях.
 4. Інтеграція – забезпечення зручної інтеграції з існуючими інформаційними системами.
 5. Масштабованість. Можливість обробки великих обсягів даних та підтримка великої кількості користувачів.
 6. Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс. Створення зручного та зрозумілого інтерфейсу для користувачів з різним рівнем технічної підготовки.
- Етапи реалізації проведеного дослідження статті будуть:
1. Аналіз предметної області та аналіз аналогів.
 2. Формулювання вимог до програмного забезпечення.
 3. Вибір мови програмування, архітектури та технологій.
 4. Розробка алгоритмів роботи модуля.
 5. Створення програмного модуля та інтеграція з іншими системами.
 6. Тестування і валідація системи на основі гнучкої технології розробки інтелектуальної системи прогнозування розвитку населення.

3. МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИ

Для ефективного аналізу демографічних тенденцій та прогнозування змін чисельності населення розроблено інтелектуальну систему. Цей інструмент забезпечує підтримку прийняття рішень у сферах соціально-економічного розвитку, розподілу ресурсів та стратегічного планування. Система об'єднує етапи збору та обробки даних, створення прогнозних моделей, інтеграцію з існуючими базами даних та візуалізацію результатів для зручного аналізу. Архітектура системи схематично зображена на рисунку 4.

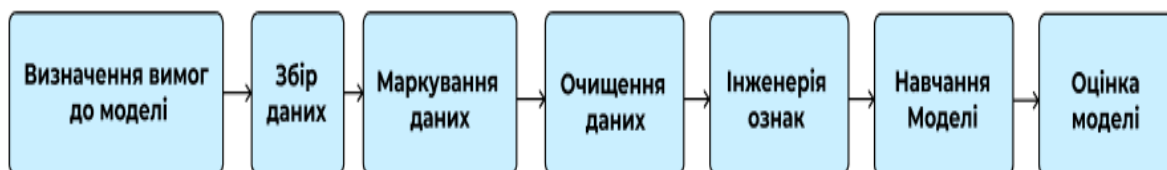


Рисунок 4 – Схема компонентів інтелектуальної системи прогнозування розвитку населення

У даному дослідженні для прогнозування чисельності населення були використані дві основні моделі: лінійна та поліноміальна регресії.

Лінійна регресія є класичним методом прогнозування, що застосовується для моделювання лінійних залежностей між змінними. У контексті прогнозування чисельності населення лінійна регресія дозволяє встановити зв'язок між часом (незалежна змінна) та чисельністю населення (залежна змінна), представляючи його у вигляді прямої лінії на графіку.

Математично лінійна регресія описується наступною формулою:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \epsilon, \quad (1)$$

де y – залежна змінна (прогнозоване значення чисельності населення), β_0 – вільний член (перетин

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

з віссю y), β_1 – коефіцієнт нахилу (параметр, що відображає вплив часу на чисельність населення), x – незалежна змінна (час), ε – випадкова похибка.

Для побудови моделі лінійної регресії використовувалися історичні демографічні дані. Оптимальні значення коефіцієнтів β_0 та β_1 були визначені за допомогою методу найменших квадратів, що дозволило мінімізувати суму квадратів відхилень між фактичними та прогнозованими значеннями.

Метод найменших квадратів (МНК) — це статистичний метод, який використовується для знаходження найкращого наближення набору даних за допомогою функції, що мінімізує суму квадратів відхилень між спостережуваними та прогнозованими значеннями.

У контексті лінійної регресії, метою МНК є знаходження таких значень коефіцієнтів β_0 та β_1 , які мінімізують функцію:

$$S(\beta_0, \beta_1) = \sum (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i))^2, \quad (2)$$

де y_i — фактичні значення чисельності населення, x_i — відповідні значення часу, β_0 та β_1 — коефіцієнти, які потрібно знайти.

Для знаходження оптимальних значень коефіцієнтів використовуються часткові похідні функції $S(\beta_0, \beta_1)$ по β_0 та β_1 :

$$\begin{aligned} \partial S / \partial \beta_0 &= -2 \sum (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i)) = 0 \\ \partial S / \partial \beta_1 &= -2 \sum x_i (y_i - (\beta_0 + \beta_1 x_i)) = 0 \end{aligned}$$

Розв'язуючи цю систему рівнянь, можна отримати формули для обчислення коефіцієнтів:

$$\begin{aligned} \beta_1 &= (n \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i) / (n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2) \\ \beta_0 &= (\sum y_i - \beta_1 \sum x_i) / n, \end{aligned}$$

де n — кількість спостережень.

Лінійна регресія є ефективною для короткострокового прогнозування у випадках, коли очікується стабільний ріст або спад чисельності населення. Для оцінки точності моделі використовувалися метрики середнього абсолютного відхилення (MAE) та середньоквадратичного відхилення (RMSE).

Поліноміальна регресія є узагальненням лінійної регресії, що дозволяє моделювати нелінійні залежності між змінними. У контексті демографічного прогнозування поліноміальна регресія є особливо корисною для довгострокових прогнозів, де спостерігаються складніші тенденції зміни чисельності населення.

Поліноміальна регресія описується наступною формулою:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \dots + \beta_n x^n + \varepsilon, \quad (3)$$

де y — залежна змінна (прогнозоване значення чисельності населення), β_i — коефіцієнти полінома, x — незалежна змінна (час), n — ступінь полінома, ε — випадкова похибка.

У даному дослідженні використовувалися поліноміальні регресії другого (квадратична) та третього (кубічна) ступенів:

Квадратична регресія ($n = 2$):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \varepsilon$$

Ця модель дозволяє моделювати криволінійні залежності з одним перегином.

Кубічна регресія ($n = 3$):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x^2 + \beta_3 x^3 + \varepsilon$$

Ця модель дозволяє моделювати складніші криволінійні залежності з двома перегинами.

Поліноміальна регресія продемонструвала ефективність для довгострокових прогнозів, де спостерігалися складніші зміни чисельності населення. Однак, точність моделі залежить від коректного вибору ступеня полінома. Для визначення оптимального ступеня використовувалася крос-валідація.

Метрики MAE та RMSE також використовувалися для оцінки точності поліноміальної регресії, де показники були кращими, ніж у лінійної регресії, особливо для довгострокових прогнозів.

Окрім лінійної та поліноміальної регресій, для прогнозування чисельності населення можуть бути використані й інші математичні моделі, такі як:

1. Експоненційне згладжування. Цей метод використовується для прогнозування часових рядів з трендами та сезонністю. Він враховує історичні дані, надаючи більшу вагу останнім спостереженням.

2. Моделі ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average). Ці моделі використовуються для аналізу та прогнозування часових рядів. Вони враховують автокореляцію та ковзне середнє, що дозволяє моделювати складні часові залежності.

3. Моделі когортно-компонентного методу. Цей метод використовується для прогнозування чисельності населення на основі даних про народжуваність, смертність та міграцію. Він враховує вікову

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

структуру населення та дозволяє прогнозувати зміни у вікових групах.

4. Моделі на основі нейронних мереж: Ці моделі використовуються для моделювання складних нелінійних залежностей. Вони можуть бути особливо корисними для прогнозування чисельності населення в умовах високої волатильності та складності даних.

Вибір конкретної моделі залежить від характеристик даних, часового горизонту прогнозування та необхідної точності.

4. РЕАЛІЗАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ РОЗВИТКУ НАСЕЛЕННЯ

Для реалізації функціоналу прогнозування була розроблена система, що використовує моделі машинного навчання для аналізу історичних даних чисельності населення та побудови прогнозів. Основні компоненти системи були реалізовані у вигляді Python-додатку з використанням бібліотек scikit-learn, pandas, streamlit і plotly.

Ключовим елементом системи має бути функціонал побудови та використання моделей регресії для прогнозування. Програма надаватиме користувачеві можливість:

- обирати країну або регіон зі списку доступних;
- вводити цільовий рік для прогнозування;
- отримувати візуалізовані результати прогнозу.

Основний алгоритм роботи методу прогнозування розвитку населення зображено на рисунку 5.

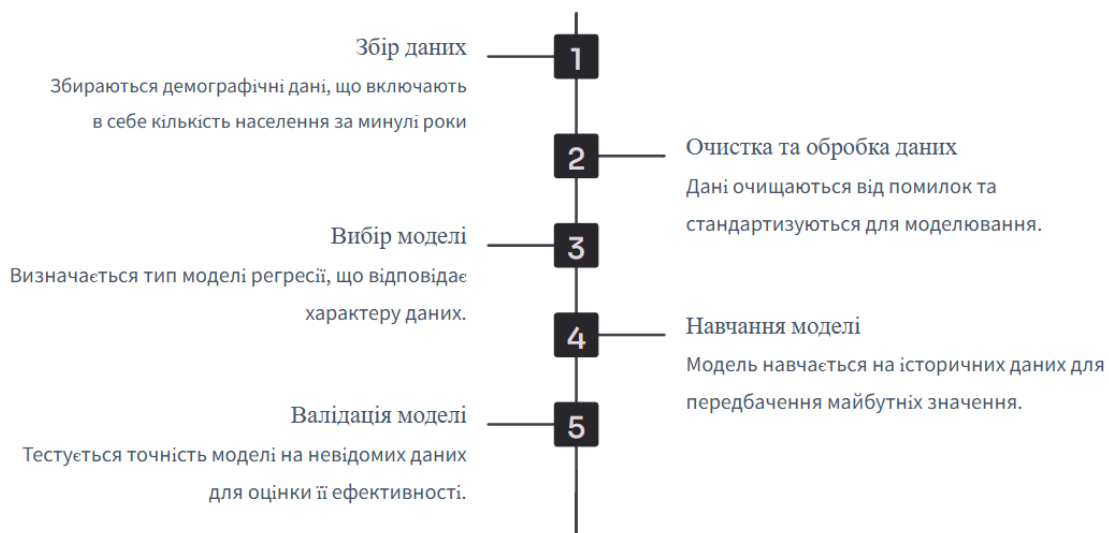


Рисунок 5 –Метод прогнозування розвитку населення

Опишемо етапи методу прогнозування розвитку населення:

1. Збір даних:

- Збір історичних даних про чисельність населення, демографічні характеристики, економічні та соціальні показники з надійних джерел.
- Врахування додаткових факторів, таких як міграція, рівень народжуваності, смертності та інші статистичні показники.

2. Попередня обробка даних:

- Очищення даних від пропущених значень (заповнення або видалення).
- Нормалізація даних для забезпечення однакових масштабів між різними характеристиками.
- Виявлення та усунення аномалій.
- Агрегація даних за необхідними ознаками (роки, країни, регіони).

3. Аналіз та вибір алгоритму машинного навчання:

- Вибір оптимального алгоритму прогнозування (лінійна регресія, поліноміальна регресія, дерева рішень тощо) на основі аналізу даних та вимог до точності.
- Визначення параметрів моделей для кожного конкретного випадку.

4. Навчання моделі:

- Розподіл даних на навчальну та тестову вибірки.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

- Навчання обраної моделі машинного навчання на основі навчальних даних.
- Перевірка точності моделі на тестових даних.

5. Оцінка моделі:

- Використання метрик точності (RMSE, MAE, R-квадрат).
- Оцінка стабільності моделі за допомогою методів крос-валідації.

6. Прогнозування:

- Використання навчених моделей для прогнозування майбутнього розвитку чисельності населення.
- Генерація прогнозів на коротко- та довгострокову перспективу.

7. Оновлення та перенавчання:

- Автоматичне оновлення моделей на основі нових даних.
- Підбір нових гіперпараметрів для покращення точності.

8. Інтерфейс та інтеграція:

- Розробка інтерфейсу для інтеграції з іншими системами або базами даних.
- Візуалізація результатів прогнозів для зручності використання.

Для реалізації функціоналу прогнозування розвитку населення в системі використовуються дві основні моделі: лінійна та поліноміальна регресія.

Лінійна регресія. Ця модель використовується для встановлення лінійної залежності між чисельністю населення та часом. Вона ефективна для прогнозування стабільних трендів, коли очікується рівномірний ріст або спад населення.

Поліноміальна регресія. Ця модель застосовується для врахування нелінійних залежностей у даних, що дозволяє моделювати складніші демографічні процеси, такі як демографічні вибухи або спади.

Основні кроки алгоритму прогнозування включають:

1. Завантаження даних. Зчитування наборів даних про населення (Countries_Population_final.csv) та списку країн (Countries_names.csv).

2. Вибір параметрів прогнозу. Користувач обирає країну чи регіон та цільовий рік для прогнозування.

3. Розділення даних. Розділення історичних даних на навчальну та тестову вибірки для оцінки точності моделей.

4. Навчання моделей. Навчання моделей лінійної та поліноміальної регресії на основі навчальних даних.

5. Прогнозування. Прогнозування чисельності населення для вибраного року за допомогою навчених моделей.

6. Візуалізація результатів. Візуалізація прогнозів у вигляді інтерактивних графіків для зручного аналізу.

Для реалізації моделі поліноміальної регресії використовується наступна функція:

```
def create_polynomial_regression_model(degree, X_train, Y_train,
X_test, target_year):
    from sklearn.preprocessing import PolynomialFeatures
    from sklearn.linear_model import LinearRegression
    from sklearn.metrics import r2_score
    import numpy as np

    # Трансформація даних
    poly_features = PolynomialFeatures(degree=degree)
    X_train_poly = poly_features.fit_transform(X_train)

    # Навчання моделі
    poly_model = LinearRegression()
    poly_model.fit(X_train_poly, Y_train)

    # Оцінка точності
    r2_test = r2_score(Y_test,
poly_model.predict(poly_features.fit_transform(X_test)))
```

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

```
# Прогноз для вибраного року
years_range = np.arange(X_train.min(), target_year + 1).reshape(-
1, 1)
predictions_poly =
poly_model.predict(poly_features.fit_transform(years_range))

return predictions_poly, r2_test
```

Функція `create_polynomial_regression_model` приймає такі аргументи:

- `degree`: ступінь полінома.
- `X_train`: навчальні дані для незалежної змінної (час).
- `Y_train`: навчальні дані для залежної змінної (чисельність населення).
- `X_test`: тестові дані для незалежної змінної.
- `target_year`: цільовий рік для прогнозування.

Система здатна прогнозувати чисельність населення, використовуючи історичні дані, такі як народжуваність, смертність, міграція та інші демографічні показники. Її відмінною рисою є можливість адаптації прогнозів до змін соціально-економічного контексту, що забезпечує актуальність результатів протягом різних часових періодів.

На рисунку 6 представлено головний інтерфейс веб-додатку інтелектуальної системи прогнозування розвитку населення. У правій частині екрана розташований порожній графік, що призначений для відображення історичних даних про чисельність населення та прогнозів, які отримані за допомогою різних моделей.

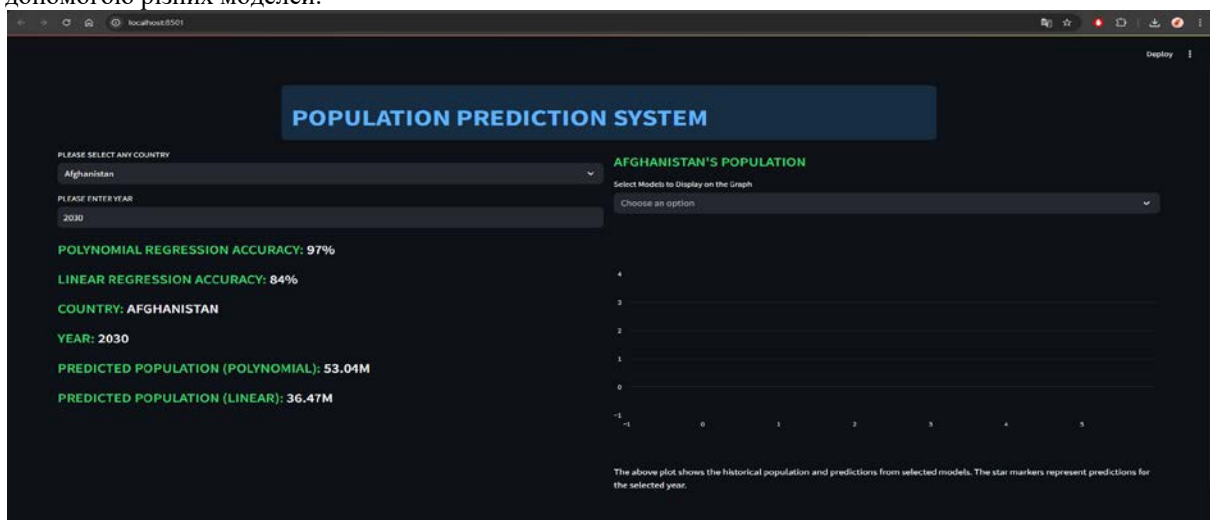


Рисунок 6 – Інтерактивний інтерфейс системи прогнозування розвитку населення

Рисунок 7 ілюструє перелік країн, доступних для вибору користувачем з метою здійснення прогнозування чисельності їхнього населення.

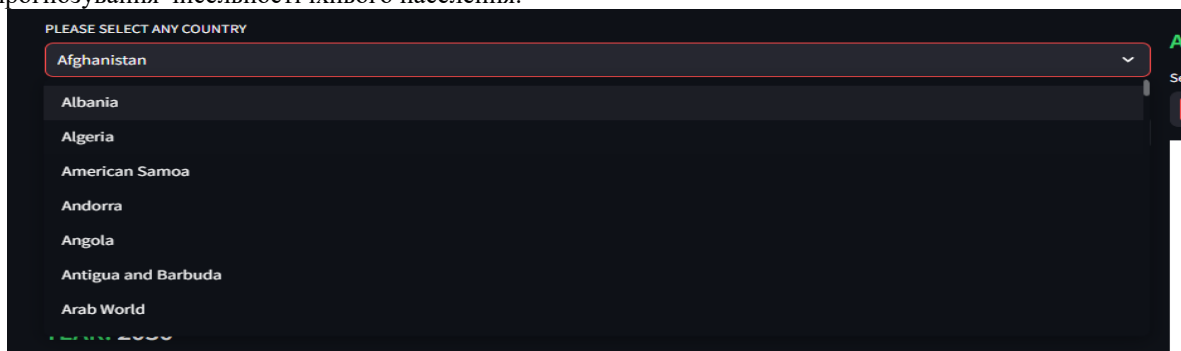


Рисунок 7 – Список країн для прогнозування розвитку населення

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

На рисунку 8 представлено кінцевий графік прогнозування демографічних показників для регіону Європа.



Рисунок 8 – Графік прогнозування розвитку населення для регіону Європа

Зокрема, перший експеримент (рисунок 8), що фокусувався на Німеччині, дозволив дослідити, наскільки ефективно моделі відтворюють національні демографічні особливості.

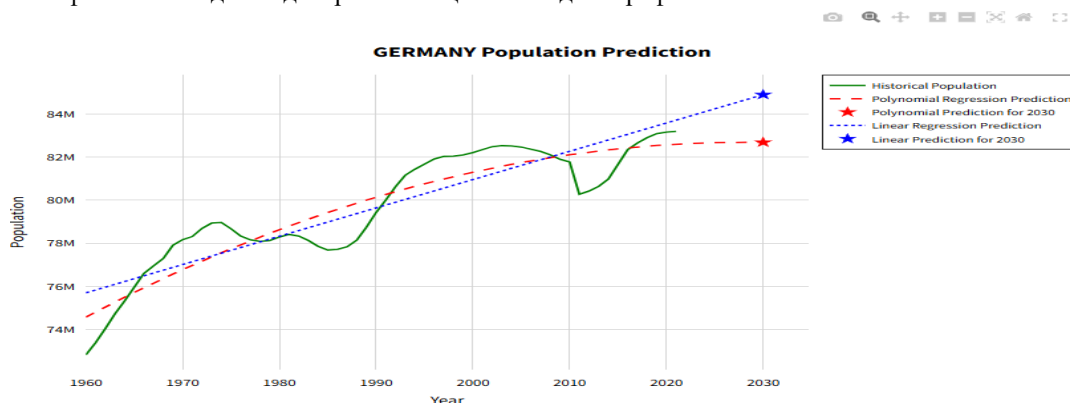


Рисунок 8 – Прогнозування розвитку населення в Німеччині

В рамках другого експерименту проводилось прогнозування на рівні світових регіонів (рисунок 9), що дозволило визначити загальні тенденції в групах країн, з урахуванням соціально-економічних та демографічних особливостей.

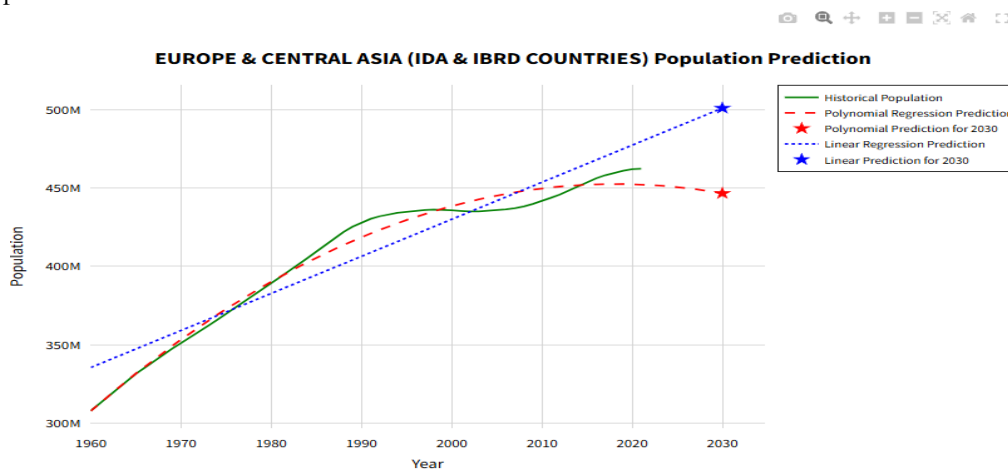


Рисунок 9 – Аналіз та прогнозування розвитку населення в Європі

В рамках третього експерименту проводилось прогнозування на рівні континентів (рисунок 10).

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

На прикладі Північної Америки, було проаналізовано глобальний розвиток населення.

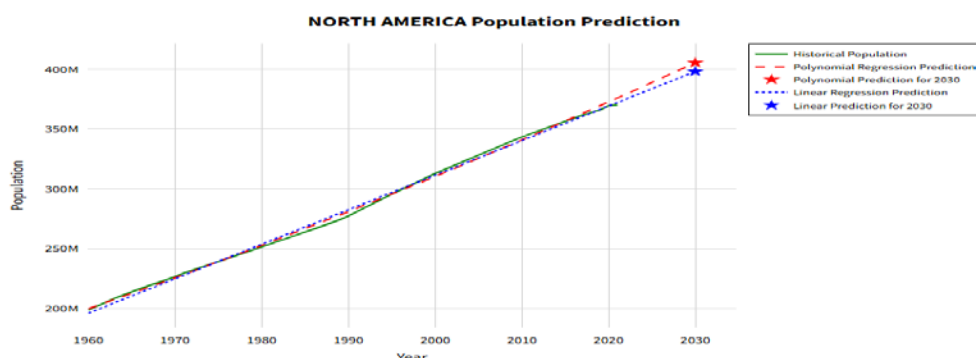


Рисунок 10 – Прогноз динаміки населення Північної Америки

Для оцінювання прогностичних можливостей різних моделей у контексті демографічних змін було проведено три експерименти. Проведено порівняння лінійної та поліноміальної регресії на предмет точності прогнозів для країн, регіонів та континентів (таблиця 1).

Таблиця 1

Результати експериментів

Назва моделі	Експеримент 1 (країни)	Експеримент 2 (регіони світу)	Експеримент 3 (материка)
Поліноміальна регресія	88%	98%	99%
Лінійна регресія	83%	91%	99%

ВИСНОВКИ

У статті було представлено підхід до розробки інтелектуальної системи прогнозування розвитку населення, яка поєднує методи машинного навчання, автоматизацію процесів моделювання та інтеграцію з інформаційними системами. Головні аспекти дослідження зосереджені на забезпеченні точності прогнозів, автоматизації обробки даних, адаптивності моделі до змінних демографічних умов, інтеграції з іншими системами та масштабованості.

Основні результати дослідження:

1. Розроблено підхід до автоматизованої побудови прогнозних моделей на основі історичних демографічних даних. Використання методів лінійної та поліноміальної регресії дозволило отримати точні прогнози на різні часові горизонти.

2. Забезпечено механізми попередньої обробки даних, включаючи автоматичне заповнення пропущених значень, нормалізацію та виявлення аномалій.

3. Інтегровано алгоритми машинного навчання, зокрема лінійну та поліноміальну регресію, Random Forest, Gradient Boosting, а також інші методи, що можуть бути розширені для обробки складних моделей прогнозування.

4. Лінійна регресія продемонструвала високу ефективність у короткострокових прогнозах, забезпечуючи низькі значення RMSE та MAE. Для довгострокових прогнозів кращою виявилася поліноміальна регресія, оскільки вона краще враховує складні тенденції змін населення та демонструє нижчі похибки. Найбільш оптимальною стала поліноміальна модель другого ступеня, тоді як модель третього ступеня показала схильність до перенавчання.

5. Забезпечено можливість регулярного оновлення моделей з урахуванням нових даних, що сприяє підвищенню точності прогнозів та адаптації до змін демографічної ситуації.

6. Розроблено інтерфейс для інтеграції з іншими інформаційними системами, що дозволяє автоматично оновлювати прогнозні дані у відповідних базах.

Отримані результати демонструють ефективність запропонованого підходу та можливість його використання у сфері стратегічного планування соціально-економічного розвитку. Перспективами

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

подальшого розвитку дослідження є розширення набору алгоритмів прогнозування, включення нейронних мереж та когортних моделей, а також підвищення рівня автоматизації всіх етапів аналізу та прогнозування.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022). World Population Prospects 2022: Summary of Results. United Nations Publication.
2. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27.
3. Tableau Software. (2023). Tableau Public. URL: <https://public.tableau.com/> (дата звернення: 2023-11-24).
4. Ahmad, F., & Bashir, S. (2020). Population forecasting using machine learning techniques. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(10), 406-412.
5. Smith, S. K., Tayman, J., & Swanson, D. A. (2018). State and local population projections: Methodology and analysis. Springer.
6. Wilson, T., Raymer, J., & Rees, P. (2020). Methods of making national population projections: How well do they work? *Population Studies*, 74(1), 103-119.
7. Дергачов В. А. (2020). Демографічні процеси в Україні та світі: виклики та тенденції розвитку. Київ: Інститут демографії та соціальних досліджень НАН України. 256 с.
8. ООН. Цілі сталого розвитку: Глобальні показники. [Електронний ресурс]. URL: <https://unstats.un.org/sdgs/> (дата звернення: 03.03.2025).
9. Лібанова Е. М. (2019). Демографічні процеси в Україні: аналіз та прогноз. Київ: Інститут демографії НАН України. 340 с.
10. World Bank. (2023). World Development Report 2023: Demographics and Global Development. Washington: World Bank Publications. 380 p.
11. Russell, S., & Norvig, P. (2021). Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4th ed. New Jersey: Pearson. 1152 p.
12. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2017). The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. New York: Springer. 767 p.
13. Дуброва О. С., & Коваленко І. В. (2022). Використання нейронних мереж для прогнозування демографічних змін. *Науковий вісник Київського університету*, (3), 45–56.
14. Малиновський Б. М. (2021). Економічні та соціальні аспекти демографічного розвитку України. *Економіка і прогнозування*, (2), 79–94.
15. Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2017). Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future. New York: W. W. Norton & Company. 416 p.
16. European Commission. Population and Demographic Trends in Europe. [Електронний ресурс]. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat> (дата звернення: 03.03.2025).
17. United Nations. The Sustainable Development Goals Report 2023. [Електронний ресурс]. URL: <https://unstats.un.org>

REFERENCES

1. United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022). World Population Prospects 2022: Summary of Results. United Nations Publication.
2. Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18-27.
3. Tableau Software. (2023). Tableau Public. URL: <https://public.tableau.com/> (access date: 2023-11-24).
4. Ahmad, F., & Bashir, S. (2020). Population forecasting using machine learning techniques. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 11(10), 406-412.
5. Smith, S. K., Tayman, J., & Swanson, D. A. (2018). State and local population projections: Methodology and analysis. Springer.
6. Wilson, T., Raymer, J., & Rees, P. (2020). Methods of making national population projections: How well do they work? *Population Studies*, 74(1), 103-119.
7. Dergachev, V. A. (2020). Demographic processes in Ukraine and the world: challenges and development trends. Kyiv: Institute of Demography and Social Research of the National Academy of Sciences of Ukraine. 256 p.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

8. UN. Sustainable Development Goals: Global indicators. [Electronic resource]. URL: <https://unstats.un.org/sdgs/> (access date: 03.03.2025).
9. Libanova, E. M. (2019). Demographic processes in Ukraine: analysis and forecast. Kyiv: Institute of Demography, NAS of Ukraine. 340 p.
10. World Bank. (2023). World Development Report 2023: Demographics and Global Development. Washington: World Bank Publications. 380 p.
11. Russell, S., & Norvig, P. (2021). Artificial Intelligence: A Modern Approach. 4th ed. New Jersey: Pearson. 1152 p.
12. Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2017). The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction. 2nd ed. New York: Springer. 767 p.
13. Dubrova, O. S., & Kovalenko, I. V. (2022). Using Neural Networks to Predict Demographic Changes. Scientific Bulletin of Kyiv University, (3), 45–56.
14. Malinovsky, B. M. (2021). Economic and Social Aspects of Demographic Development of Ukraine. Economics and Forecasting, (2), 79–94.
15. Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2017). Machine, Platform, Crowd: Harnessing Our Digital Future. New York: W. W. Norton & Company. 416 p.
16. European Commission. Population and Demographic Trends in Europe. [Electronic resource]. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat> (accessed: 03.03.2025).
17. United Nations. The Sustainable Development Goals Report 2023. [Electronic resource]. URL: <https://unstats.un.org>

Надійшла до редакції 20.02.2025р.

УГРИН ДМИТРО ІЛІЧ – доктор технічних наук, професор, доцент кафедри комп’ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна.

e-mail: d.ugryn@chnu.edu.ua

УШЕНКО ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач комп’ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. **e-mail: y.ushenko@chnu.edu.ua**

ТЕРЛЕЦЬКИЙ ТАРАС ВОЛОДИМИРОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп’ютерної інженерії та безпеки, Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна. **e-mail: t.terletskyi@lntu.edu.ua**

КАЙДИК ОЛЕГ ЛЕОНТІЙОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп’ютерної інженерії та безпеки, Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна. **e-mail: o.kaidyk@lntu.edu.ua**

ДОБРОВОЛЬСЬКИЙ ЮРІЙ ГЕОРГІЙОВИЧ – доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. **e-mail: y.dobrovolsky@chnu.edu.ua**

ШКІДІНА КАТЕРИНА СЕРГІЇВНА – студентка-магістрантка кафедри комп’ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. **e-mail: shkidina.kateryna@chnu.edu.ua**

D.I. UHRYN, YU.O. USHENKO, T.V. TERLETSKYI,
O.L. KAIDYK, Yu.G. DOBROVOLSKY, K.S. SHKIDINA

AGILE TECHNOLOGY FOR DEVELOPING AN INTELLIGENT POPULATION DEVELOPMENT FORECASTING SYSTEM

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Lutsk National Technical University

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 004.8, 004.9

Д.І. УГРИН, Ю.О. УШЕНКО, Ю.Я. ТОМКА, К.П. ГАЗДЮК,
В.В. ДВОРЖАК, Д.А. БЛОБРИЦЬКИЙ

ГНУЧКІ МЕТОДОЛОГІЇ УПРАВЛІННЯ РИЗИКАМИ В ЖИТТЄВОМУ ЦИКЛІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ РІШЕНЬ ДИНАМІКИ РИНКОВИХ АКЦІЙ

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

Анотація. У статті досліджено проблему прогнозування динаміки ринкових акцій із використанням сучасних методів машинного навчання. Висока волатильність фінансових ринків і значний рівень невизначеності роблять актуальним застосування автоматизованих інтелектуальних систем для підвищення точності прогнозування та оптимізації інвестиційних стратегій. Запропонована система поєднує моделі машинного навчання Prophet та LSTM (Long Short-Term Memory) для аналізу часових рядів, а також метод Монте-Карло для оцінки ризиків. Розроблено алгоритм збору, очищення та попередньої обробки фінансових даних, що включає отримання історичних курсів акцій з платформи Yahoo Finance, нормалізацію, усунення викидів та формування навчальних вибірок. Архітектура системи складається з модулів збору та обробки даних, побудови прогнозних моделей та оцінки ризиків. Проведено експериментальне дослідження ефективності запропонованих методів на основі реальних фінансових даних. Порівняльний аналіз точності прогнозування показав, що використання LSTM дозволяє досягти середньої точності на рівні 92,4%, тоді як Prophet демонструє точність 88,7%. Оцінка ризиків із застосуванням методу Монте-Карло дозволила визначити ймовірність екстремальних змін вартості активів та їхній вплив на інвестиційний портфель. Отримані результати підтверджують доцільність використання запропонованої системи для прогнозування фінансових ринків. Подальші дослідження зосереджуватимуться на покращенні точності моделей шляхом інтеграції додаткових макроекономічних індикаторів та вдосконаленні адаптивних механізмів налаштування параметрів прогнозування.

Ключові слова: прогнозування динаміки ринкових акцій, інтелектуальний аналіз даних, машинне навчання, моделі Prophet, LSTM, метод Монте-Карло, оцінка ризиків, фінансовий ринок.

Abstract. The article investigates the problem of forecasting market share dynamics using modern machine learning methods. The high volatility of financial markets and a significant level of uncertainty make the use of automated intelligent systems relevant for increasing forecasting accuracy and optimizing investment strategies. The proposed system combines Prophet and LSTM (Long Short-Term Memory) machine learning models for time series analysis, as well as the Monte Carlo method for risk assessment. An algorithm for collecting, cleaning, and preprocessing financial data has been developed, which includes obtaining historical stock prices from the Yahoo Finance platform, normalization, eliminating outliers, and forming training samples. The system architecture consists of modules for collecting and processing data, building forecasting models, and assessing risks. An experimental study of the effectiveness of the proposed methods based on real financial data was conducted. A comparative analysis of forecasting accuracy showed that using LSTM allows achieving an average accuracy of 92.4%, while Prophet demonstrates an accuracy of 88.7%. Risk assessment using the Monte Carlo method allowed us to determine the probability of extreme changes in asset values and their impact on the investment portfolio. The results obtained confirm the feasibility of using the proposed system for forecasting financial markets. Further research will focus on improving the accuracy of the models by integrating additional macroeconomic indicators and improving adaptive mechanisms for setting forecasting parameters.

Keywords: forecasting market share dynamics, data mining, machine learning, Prophet models, LSTM, Monte Carlo method, risk assessment, financial market.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-111-122

ВСТУП

У сучасних умовах глобалізації та стрімкого розвитку технологій завдання інтелектуальної обробки та прогнозування динаміки ринкових акцій набуває ключового значення. Фінансові ринки, які характеризуються високою динамічністю та непередбачуваністю, потребують точного аналізу для ефективного прийняття рішень. Це зумовлює зростання попиту на надійні інструменти прогнозування з боку інвесторів, фінансових аналітиків та трейдерів.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Прогнозування змін курсів акцій є критично важливим завданням для різних категорій користувачів. Для інвесторів точні методи прогнозування сприяють зменшенню фінансових ризиків та максимізації прибутків. Фінансові аналітики та трейдери, у свою чергу, використовують системи прогнозування для аналізу ринкових тенденцій і формування обґрунтованих стратегій купівлі чи продажу активів.

Необхідність проведення досліджень у цій сфері обумовлена такими основними факторами:

1. Підвищення волатильності фінансових ринків. Зростання економічної невизначеності, вплив глобальних криз і швидкі зміни у ринкових умовах створюють значні ризики для інвесторів, які потребують ефективних інструментів для управління цими ризиками.

2. Розвиток технологій і доступність великих даних. Швидкий розвиток технологій Big Data і штучного інтелекту дозволяє аналізувати великі обсяги фінансових даних у реальному часі, підвищуючи точність прогнозування.

3. Зростання складності фінансових інструментів. Сучасні фінансові ринки використовують складні похідні інструменти, управління якими вимагає точних і швидких рішень, базованих на прогнозних моделях.

4. Необхідність адаптації до швидкозмінних умов. Традиційні методи аналізу часто виявляються недостатньо ефективними у реаліях сучасного ринку, що зумовлює потребу у використанні інноваційних математичних моделей і алгоритмів машинного навчання.

5. Формування конкурентних переваг. Точне прогнозування дозволяє учасникам фінансових ринків займати більш вигідні позиції у порівнянні з конкурентами, що є важливим для інституційних інвесторів та фінансових компаній.

Актуальність проблеми обумовлює необхідність застосування сучасних методів інтелектуального аналізу даних, машинного навчання та математичних моделей для прогнозування динаміки ринкових акцій. Інтеграція таких інструментів у процес прийняття рішень дозволяє підвищити ефективність управління фінансовими активами, забезпечуючи їхню адаптивність до динамічних умов ринку.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛОГІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

У сучасному світі, де глобалізація та технологічний прогрес визначають розвиток фінансових ринків, інтелектуальний аналіз та прогнозування динаміки ринкових акцій набуває вирішального значення. Волатильність та непередбачуваність фінансових ринків зумовлюють потребу в точних інструментах прогнозування для ефективного прийняття рішень інвесторами, фінансовими аналітиками та трейдерами.

Дослідження в сфері прогнозування динаміки ринкових акцій є надзвичайно актуальними з огляду на такі фактори:

1. Підвищення волатильності. Глобальна економічна нестабільність, кризи та швидкі зміни ринкових умов збільшують ризики для інвесторів, що потребує ефективних інструментів управління цими ризиками;

2. Розвиток технологій. Технології Big Data та штучного інтелекту відкривають можливості для аналізу великих обсягів фінансових даних у реальному часі, що сприяє підвищенню точності прогнозування.

3. Зростання складності фінансових інструментів. Сучасні фінансові ринки характеризуються складними похідними інструментами, управління якими вимагає швидких та точних рішень на основі прогнозних моделей.

4. Необхідність адаптації. Традиційні методи аналізу часто є недостатньо ефективними в умовах сучасного ринку, що зумовлює потребу в інноваційних математичних моделях та алгоритмах машинного навчання.

5. Конкурентні переваги. Точне прогнозування дозволяє учасникам ринку займати вигідніші позиції порівняно з конкурентами.

У науковій літературі представлено широкий спектр досліджень, присвячених прогнозуванню динаміки ринкових акцій. Автори використовують різноманітні методи, серед яких:

1. Статистичні моделі: авторегресія (AR) [1], ковзне середнє (MA) [2], моделі ARCH [3] та GARCH [4];

2. Машинне навчання: нейронні мережі (зокрема LSTM) [5], дерева рішень [6], метод опорних

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

векторів [7], Prophet [8];

3. Фундаментальний аналіз: аналіз фінансової звітності компаній, економічних показників та інших факторів, що впливають на вартість акцій [9].

4. Технічний аналіз: використання графіків, індикаторів та інших інструментів для ідентифікації трендів та прогнозування майбутніх змін цін [10].

Існує багато розробок, спрямованих на створення систем прогнозування динаміки ринкових акцій. Серед них можна виділити:

1. Програмні продукти: Bloomberg Terminal [11], Refinitiv Eikon [12], MetaTrader [13].

2. Онлайн-платформи: TradingView [14], Yahoo Finance [15], Google Finance [16].

3. Системи штучного інтелекту: розробки компаній, що спеціалізуються на фінансових технологіях (FinTech) [17].

Представлене дослідження зосереджено на розробці інтелектуальної системи прогнозування рішень щодо динаміки ринкових акцій. Система інтегрує сучасні методи машинного навчання (Prophet, LSTM) та метод Монте-Карло для оцінки ризиків. Особлива увага приділяється створенню інтерактивної платформи для аналізу ринкових тенденцій та формування рекомендацій щодо інвестицій.

Огляд літератури та аналогів досліджень показує, що проблема прогнозування динаміки ринкових акцій є актуальною та досліджуваною. Існує широкий спектр методів та інструментів, які використовуються для вирішення цієї задачі. Представлене дослідження пропонує інтелектуальну систему, що поєднує сучасні технології аналізу даних, прогнозування та підтримки прийняття рішень, спрямовану на підвищення ефективності управління фінансовими активами в умовах динамічного ринку.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ЦІЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Метою дослідження є розробка інтелектуальної системи прогнозування рішень щодо динаміки ринкових акцій, яка забезпечує точне передбачення змін курсів акцій, інтегрує оцінку ризиків та надає практичні інструменти для підтримки ухвалення рішень в умовах невизначеності фінансових ринків.

На основі мети можна виділити цілі дослідження:

1. Створення бази даних для аналізу ринку акцій:

- Збір, обробка та систематизація історичних і поточних даних про курси ринкових акцій із надійних джерел, таких як Yahoo Finance, із використанням сучасних технологій автоматизації;

- Виявлення ключових факторів, які впливають на динаміку ринкових акцій.

2. Розробка прогнозних моделей:

- Використання алгоритмів машинного навчання, таких як Prophet і LSTM, для моделювання динаміки курсів акцій;

- Інтеграція методу Монте-Карло для оцінки ризиків і прогнозування вартості інвестиційного портфеля за різними сценаріями.

3. Розробка системи підтримки рішень:

- Створення інтерактивної платформи для аналізу ринкових тенденцій, прогнозування курсів акцій і формування рекомендацій щодо інвестицій;

- Впровадження засобів візуалізації для зручного представлення результатів прогнозування та аналітики.

4. Оцінка точності моделей:

- Проведення тестування розроблених моделей із використанням метрик, таких як R^2 , MAE, MSE та RMSE;

- Аналіз точності прогнозів у короткостроковій та довгостроковій перспективі.

5. Розробка нефункціональних характеристик системи:

- Забезпечення масштабованості системи для роботи з великими обсягами даних і підтримки великої кількості користувачів;

- Гарантування надійності та безпеки платформи через інтеграцію хмарних технологій, резервного копіювання та сучасних методів шифрування;

- Забезпечення інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу для різних категорій користувачів.

6. Врахування впливу зовнішніх факторів:

- Аналіз залежності точності системи від стабільності зовнішніх джерел даних і бібліотек машинного навчання;

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

- Розробка стратегії адаптації системи до можливих змін у зовнішніх API та інфраструктурі.

Досягнення поставлених цілей дозволить створити систему, яка об'єднає сучасні технології аналізу даних, прогнозування та підтримки рішень, забезпечуючи ефективне управління фінансовими активами та адаптацію до викликів сучасного ринку.

Система ґрунтується на низці важливих припущень та залежностей, необхідних для її ефективного функціонування. Зокрема, передбачається, що доступ до даних про ринкові курси акцій буде забезпечено у достатній кількості та якості, що дозволить проводити аналіз та прогнозування з високою точністю. Основними джерелами даних виступатимуть сервіси на кшталт Yahoo Finance, які повинні надавати актуальну та достовірну інформацію.

Алгоритми машинного навчання, такі як Prophet та LSTM для прогнозування, а також Monte-Carlo для оцінки ризиків, передбачається використовувати із розрахунком на їхню достатню точність для створення якісних прогнозів. Технічна інфраструктура має бути стабільною, забезпечуючи безперервну роботу системи, оперативну обробку даних та належний рівень продуктивності. Також вважається, що користувачі матимуть базові знання у сфері фінансового аналізу, що дозволить їм ефективно працювати з функціоналом системи. Регулярні оновлення забезпечуватимуть актуальність даних та вдосконалення прогнозних алгоритмів.

Система залежить від зовнішніх API та сервісів, таких як Yahoo Finance, від яких залежить якість та актуальність прогнозів. Використання інструментів машинного навчання (scikit-learn, Prophet) та фреймворків (наприклад, Streamlit) є критичним для її функціонування. Зміни або оновлення цих інструментів можуть впливати на роботу системи. Для обробки та зберігання великих обсягів даних система покладається на хмарні сервіси та сервери, продуктивність і стабільність яких мають вирішальне значення для швидкості та надійності роботи. Врахування цих припущень та залежностей є важливим для успішного запуску та стабільної роботи системи аналізу й прогнозування ринкових акцій.

3. МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИ

Система прогнозування рішень динаміки ринкових акцій складається з декількох ключових компонентів, кожен з яких відіграє важливу роль у її функціонуванні. Ці компоненти глибоко інтегровані між собою, що забезпечує ефективність системи та досягнення її цілей. На рис. 1 показані взаємозв'язки між ними.

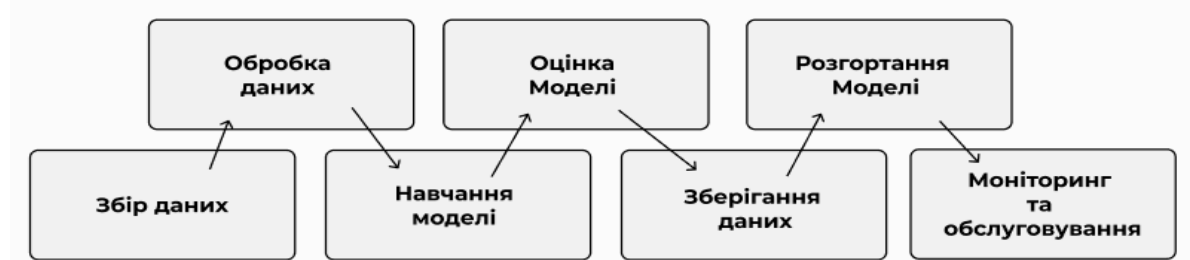


Рисунок 1 – Взаємодія між компонентами системи

Опишемо основні компоненти системи прогнозування рішень динаміки ринкових акцій:

1. Компонент збору даних (Data Collection Component): відповідає за отримання інформації з різних джерел, зокрема фінансових ринків, економічних індикаторів та інших релевантних даних. Використовує бібліотеки, такі як ufinance, для автоматизованого збору інформації.

2. Компонент обробки даних (Data Processing Component): виконує очищення, трансформацію та підготовку даних для подальшого використання. Включає обробку пропущених значень, нормалізацію та фільтрацію шуму для підвищення якості даних.

3. Компонент навчання моделі (Model Training Component): відповідає за створення прогнозних моделей на основі підготовлених даних. Використовує алгоритми, такі як Prophet для прогнозування тенденцій та Monte-Carlo для аналізу ризиків.

4. Компонент оцінки моделі (Model Evaluation Component): виконує аналіз точності та продуктивності моделей за допомогою метрик (R^2 , MAE, MSE, RMSE), що дозволяє оцінити ефективність прогнозування та виявити можливі покращення.

5. Компонент зберігання даних (Data Storage Component): забезпечує надійне збереження вхідних

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

та оброблених даних у базах даних або хмарних сховищах, що дозволяє швидкий доступ та масштабованість системи.

6. Компонент розгортання моделі (Model Deployment Component): відповідає за інтеграцію навчених моделей у виробниче середовище. Використовує фреймворк Streamlit для створення інтерактивних веб-додатків, які надають прогнози даних користувачам.

7. Компонент моніторингу та обслуговування (Monitoring and Maintenance Component): здійснює безперервний контроль продуктивності моделей у реальному часі та оновлення алгоритмів для підтримки їхньої актуальності.

Таким чином, система буде активно взаємодіяти із зовнішніми джерелами даних (фінансовими ринками, економічними показниками тощо) та кінцевими користувачами, які використовують отримані прогнози для ухвалення рішень.

Компоненти системи інтегровані у єдиний потік обробки даних: зібрана інформація проходить етапи обробки, передається до компонента навчання моделі, після чого її оцінка визначає подальші кроки, такі як коригування параметрів або повторне навчання.

Таким чином, система прогнозування рішень динаміки ринкових акцій є складною та взаємозалежною структурою, що вимагає ефективної координації всіх компонентів для досягнення високої точності прогнозів та підтримки стабільності роботи.

Проведемо опис математичних моделей прогнозування часових рядів у сфері фінансів на основі моделей Prophet, LSTM, і методу Монте-Карло для прогнозування рішень динаміки ринкових акцій:

1. Модель Prophet розроблена для прогнозування часових рядів з сезонними компонентами [1]. Вона моделює дані за допомогою адитивної або мультиплікативної структури:

$$y(t) = g(t) + s(t) + h(t) + \epsilon_t,$$

де $y(t)$ – прогнозоване значення в момент часу t , $g(t)$ – тренд (довгострокова зміна), $s(t)$ – сезонність (періодичні коливання), $h(t)$ – вплив свята чи події (дискретні збурення), ϵ_t – залишковий шум, що моделюється як гауссівський шум $\epsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$.

Основними параметрами в моделі є:

1.1. Трендова функція – лінійний або логістичний тренд.

Лінійний тренд виражається як:

$$g(t) = (k + \delta_t)t + m,$$

де k – швидкість зміни, m – зсув.

Логістичний тренд (з обмеженням) подається у вигляді:

$$g(t) = \frac{C}{1 + \exp(-k(t - m))},$$

Де C – асимптотичний максимум.

1.2. Сезонність (гармонічні функції) задається за допомогою тригонометричних функцій:

$$s(t) = \sum_{n=1}^N \left(a_n \cos\left(\frac{2\pi n t}{P}\right) + b_n \sin\left(\frac{2\pi n t}{P}\right) \right),$$

де P – період (наприклад, 365 днів для річної сезонності).

1.3. Свята чи події (індикаторні змінні), де використовуються індикаторні змінні для позначення впливу конкретних подій, що задається у вигляді:

$$h(t) = \sum_{i=1}^L a_i \cdot 1_{\{t \in \text{holiday}_i\}}$$

2. Модель LSTM (Long Short-Term Memory) – це тип рекурентних нейронних мереж (RNN), що здатний працювати з довгостроковими залежностями [2]. Для моделі LSTM застосовуються рівняння:

1. Вхід:

$$x_t \in R^n,$$

де x_t – вектор значень у момент часу t .

2. Стани шарів:

- Внутрішній стан (cell state): c_t .
- Прихований стан (hidden state): h_t .

3. Головні рівняння:

- Забуваючий шар:

$$f_t = \sigma(W_f \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_f),$$

σ – сигмоїдальна функція активації, яка визначає, які дані з попереднього стану c_{t-1} зберігати.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

- Шар введення:

$$i_t = \sigma(W_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i),$$

$$\hat{c}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c),$$

- Оновлення стану:

$$c_t = f_t * c_{t-1} + i_t * \hat{c}_t$$

- Вихідний шар:

$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o),$$

$$h_t = o_t * \tanh(c_t).$$

4. Прогноз. На останньому шарі використовується повнозв'язний шар, щоб отримати фінальне прогнозоване значення y_t :

$$\hat{y}_t = \text{Dense}(h_t).$$

3. Метод Монте-Карло – базується на ітеративному генеруванні випадкових сценаріїв розвитку часових рядів для оцінки ймовірного розподілу можливих результатів.

Опишемо алгоритм.

1. Моделювання ціни акцій. Ціна акції моделюється за допомогою геометричного броунівського руху:

$$S_{t+\Delta t} = S_t \cdot \exp\left(\left(\mu - \frac{\sigma^2}{2}\right)\Delta t + \sigma \cdot \epsilon \cdot \sqrt{\Delta t}\right),$$

де S_t – ціна акції в момент часу t , μ – середній очікуваний темп зростання, σ – волатильність (мінливість), $\epsilon \sim N(0,1)$ – випадкова величина з нормального розподілу.

2. Багаторазове повторення. Генерується N траєкторій цін акцій ($N \gg 1000$), кожна з яких моделює можливий сценарій.

3. Оцінка прогнозу. Для отриманих траєкторій розраховуються середні або довірчі інтервали:

$$\hat{S}_T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S_T^{(i)}$$

де $S_T^{(i)}$ – значення ціни на кінцевий момент часу для i -ої траєкторії.

Представимо діаграму взаємодії розробленої системи прогнозування рішень динаміки ринкових акцій. На рис. 2 зображено її структуру.

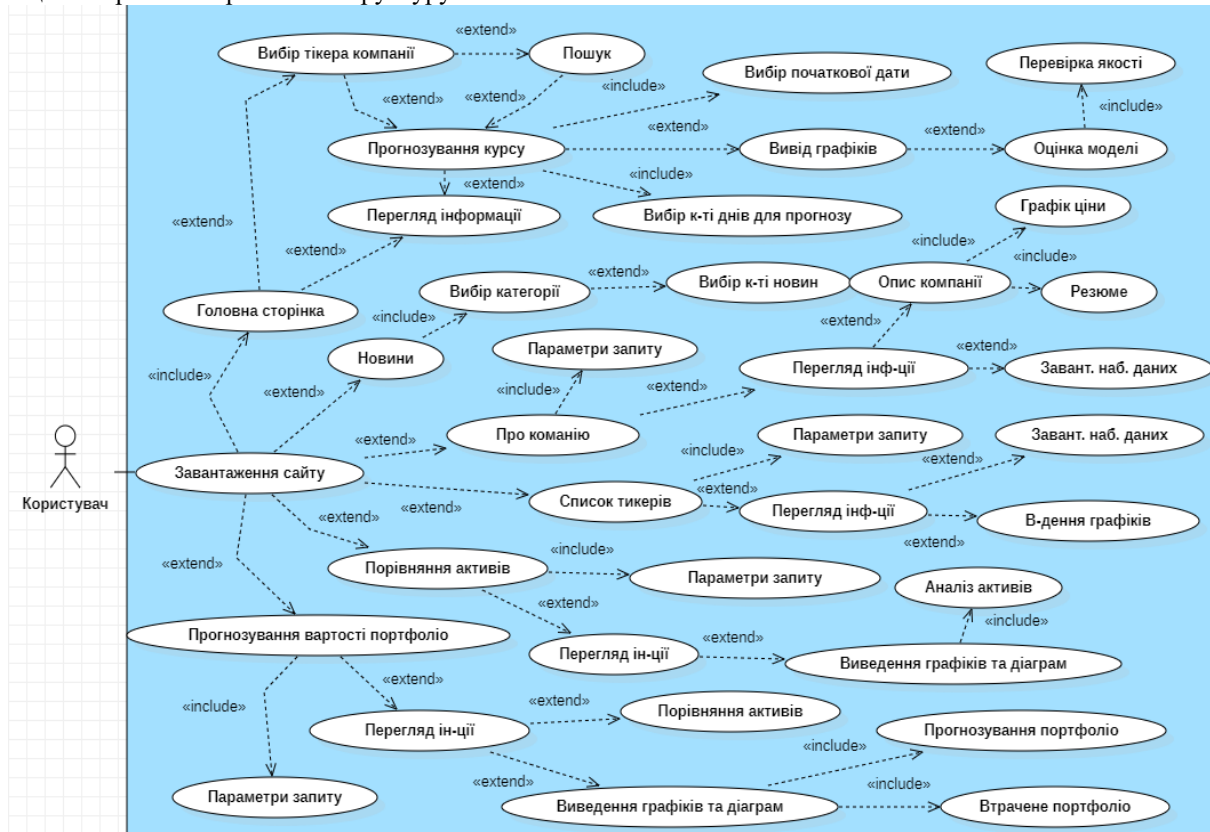


Рисунок 2 – Діаграма взаємодії системи прогнозування рішень динаміки ринкових акцій

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Етап підготовки вхідних даних для навчання моделей машинного навчання є ключовим для точності прогнозів. Завантаження та обробка фінансових даних із Yahoo Finance забезпечують доступ до якісних історичних даних ринкових акцій, необхідних для аналізу та розпізнавання трендів. Платформа пропонує зручні формати даних (API, CSV) і підтримує широкий спектр ринків, що робить її універсальним інструментом для фінансового аналізу (рис. 3).



Рисунок 3 – Сайт Yahoo Finance

Процес завантаження та обробки фінансових даних передбачає вибір ключових параметрів із Yahoo Finance, які є основою для прогнозування, аналізу ринкових трендів, оцінки ризиків і ухвалення інвестиційних рішень.

Історичні дані готуються для моделі Prophet шляхом вибору стовпців "Date" і "Close", які перейменовуються у "ds" (дата) та "y" (ціна закриття). Це забезпечує обробку часових рядів із урахуванням трендів і сезонних коливань.

	↑ Symbol	Security	GICS Sector	GICS Sub-Industry	Headquarters Location	Date added	CIK	Founded
12	A	Agilent Technologies	Health Care	Health Care Equipment	Santa Clara, California	2000-06-05	1,090,872	1999
29	AAL	American Airlines Group Inc.	Industrials	Passenger Airlines	Fort Worth, Texas	2015-03-23	6,201	1934
9	AAP	Advance Auto Parts	Consumer Discretionary	Automotive Retail	Raleigh, North Carolina	2015-07-09	1,158,449	1932
44	AAPL	Apple Inc.	Information Technology	Technology Hardware, Storage & Peripherals	Cupertino, California	1982-11-30	320,193	1977
3	ABBV	AbbVie	Health Care	Pharmaceuticals	North Chicago, Illinois	2012-12-31	1,551,152	2013 (1888)
36	ABC	AmerisourceBergen	Health Care	Health Care Distributors	Conshohocken, Pennsylvania	2001-08-30	1,140,859	1985
2	ABT	Abbott	Health Care	Health Care Equipment	North Chicago, Illinois	1957-03-04	1,800	1888
47	ACGL	Arch Capital Group	Financials	Reinsurance	Hamilton, Bermuda	2022-11-01	947,484	1995
4	ACN	Accenture	Information Technology	IT Consulting & Other Services	Dublin, Ireland	2011-07-06	1,467,373	1989
7	ADBE	Adobe Inc.	Information Technology	Application Software	San Jose, California	1997-05-05	796,343	1982
40	ADI	Analog Devices	Information Technology	Semiconductors	Wilmington, Massachusetts	1999-10-12	6,281	1965
6	ADM	ADM	Consumer Staples	Agricultural Products & Services	Chicago, Illinois	1957-03-04	7,084	1902

Рисунок 4 – Детальна інформація про організації

Користувач самостійно визначає обсяг даних, з якими буде працювати, встановлюючи діапазон дат та інші параметри. Цей гнучкий підхід дозволяє адаптувати обробку даних під конкретні завдання та потреби користувача. Для отримання детальної інформації про компанії, які входять до індексу S&P 500, використовується інший набір даних. Кожен стовпчик у цій таблиці містить певну інформацію про кожну компанію, таку як:

- Symbol: символ або скорочена назва компанії (тип: string);

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

- Security: повна назва компанії (тип: string);
- GICS Sector: сектор GICS, до якого належить компанія (тип: string);
- GICS Sub-Industry: підгалузь GICS, до якої належить компанія (тип: string);
- Headquarters Location: місцезнаходження головного офісу компанії (тип: string);
- Date added: дата першого додавання компанії до індексу S&P 500 (тип: date);
- CIK (Central Index Key): унікальний ідентифікатор для ідентифікації компаній в документах, поданих до SEC (тип: int);
- Founded: рік заснування компанії і початку її діяльності (тип: string).

На рисунку 4 показано компанії у секторі, обраному користувачем.

На рисунку 5 представлено процес завантаження користувачем набору даних. Після завантаження інформація зберігається у структурованому форматі, що спрощує подальший аналіз та прогнозування за допомогою моделей машинного навчання.

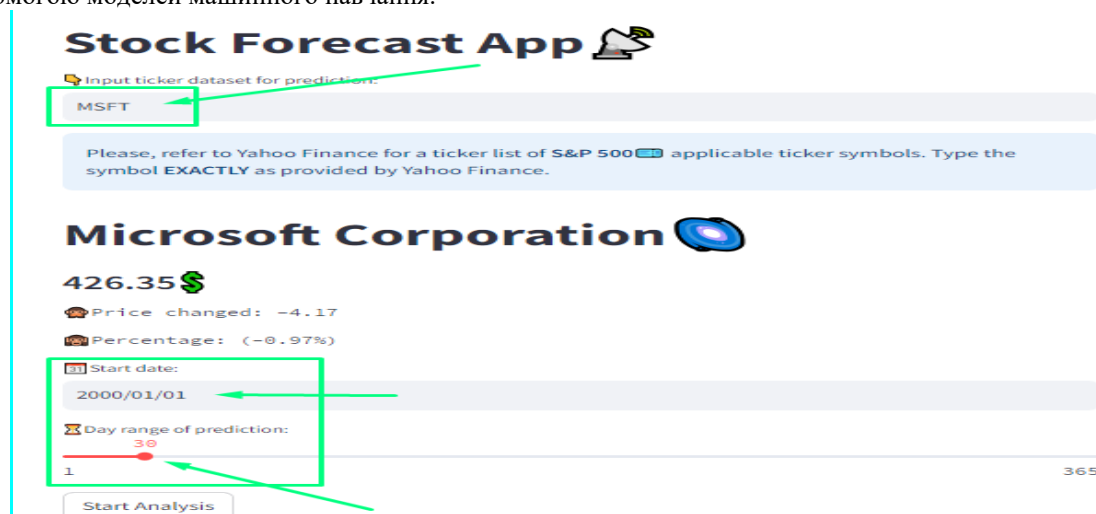


Рисунок 5 – Процес завантаження даних з Yahoo Finance

Реалізовано можливість вибору початкової дати та діапазону днів для прогнозування. Користувач задає дату початку за допомогою функції `st.date_input`, що дозволяє обрати дату з календаря. Початкове значення встановлено на 1 січня 2000 року. Поточна дата автоматично визначається та форматується у вигляді рядка. Дані за вибраний період завантажуються за допомогою функції `yf.download`, де `selected_stock` — це обраний фінансовий інструмент, а діапазон часу охоплює період від зазначеної дати до сьогодні.

Крім того, реалізовано слайдер для вибору кількості днів прогнозування. Діапазон можливих значень складає від 1 до 365 днів, з початковим значенням 30 днів. Якщо вибраний період перевищує 90 днів, система виводить попередження про можливе зниження точності прогнозу.

```
# Вибір дати
START = st.date_input("Початкова дата:", date(2000, 1, 1))
TODAY = date.today().strftime("%Y-%m-%d")
data = yf.download(selected_stock, START, TODAY)

# Вибір діапазону днів
n_years = st.slider("Діапазон днів для прогнозування:", 1, 365, 30)
period = n_years
if n_years >= 91:
    st.warning("Чим довший період прогнозування, тим нижча точність.")
```

Для кожного вибраного фінансового інструменту завантажуються такі атрибути:

- Date (Дата) – дата торгового дня.
- Open (Ціна відкриття) – ціна акції на початку торгової сесії.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

- High (Максимальна ціна) – найвища ціна, досягнута акцією протягом дня.
- Low (Мінімальна ціна) – найнижча ціна, досягнута акцією протягом дня.
- Close (Ціна закриття) – ціна акції на момент закриття торгів.
- Adj Close (Відкоригована ціна закриття) – ціна закриття, скоригована з урахуванням корпоративних змін, таких як поділ акцій і виплата дивідендів.
- Volume (Обсяг торгів) – кількість акцій, куплених або проданих протягом дня.

Завантажений набір даних містить усі зазначені атрибути та доступний для перегляду користувачем, як показано на рисунку 6.

Raw [MSFT] Dataset

Dataset Uploaded successfully! ✓

Check it Out

	Date	Open	High	Low	Close	Adj Close	Volume
0	2000-01-03 00:00:00	58.6875	59.3125	56	58.2813	36.0006	53,228,400
1	2000-01-04 00:00:00	56.7813	58.5625	56.125	56.3125	34.7845	54,119,000
2	2000-01-05 00:00:00	55.5625	58.1875	54.6875	56.9063	35.1513	64,059,600
3	2000-01-06 00:00:00	56.0938	56.9375	54.1875	55	33.9738	54,976,600
4	2000-01-07 00:00:00	54.3125	56.125	53.6563	55.7188	34.4178	62,013,600

	Date	Open	High	Low	Close	Adj Close	Volume
6,131	2024-05-16 00:00:00	421.8	425.42	420.35	420.99	420.99	17,530,100
6,132	2024-05-17 00:00:00	422.54	422.92	418.03	420.21	420.21	15,352,200
6,133	2024-05-20 00:00:00	420.21	426.77	419.99	425.34	425.34	16,272,100
6,134	2024-05-21 00:00:00	426.83	432.97	424.85	429.04	429.04	21,453,300
6,135	2024-05-22 00:00:00	430.09	432.41	427.13	430.52	430.52	18,021,300

Рисунок 6 – Відображення набору даних у системі

Процес завантаження та обробки фінансових даних передбачає вибір ключових атрибутів з Yahoo Finance, необхідних для подальшого прогнозування. Це створює надійну основу для аналізу ринкових трендів, оцінки ризиків та прийняття інвестиційних рішень.

Модель Prophet підтримує річну, тижневу та денну сезонність, що дозволяє враховувати циклічні зміни, покращуючи точність прогнозів і допомагаючи адаптувати інвестиційні стратегії до ринкових коливань. Графіки сезонності (рис. 7) ілюструють внесок різних циклів у прогнозовані значення, допомагаючи краще розуміти вплив часових патернів на дані.

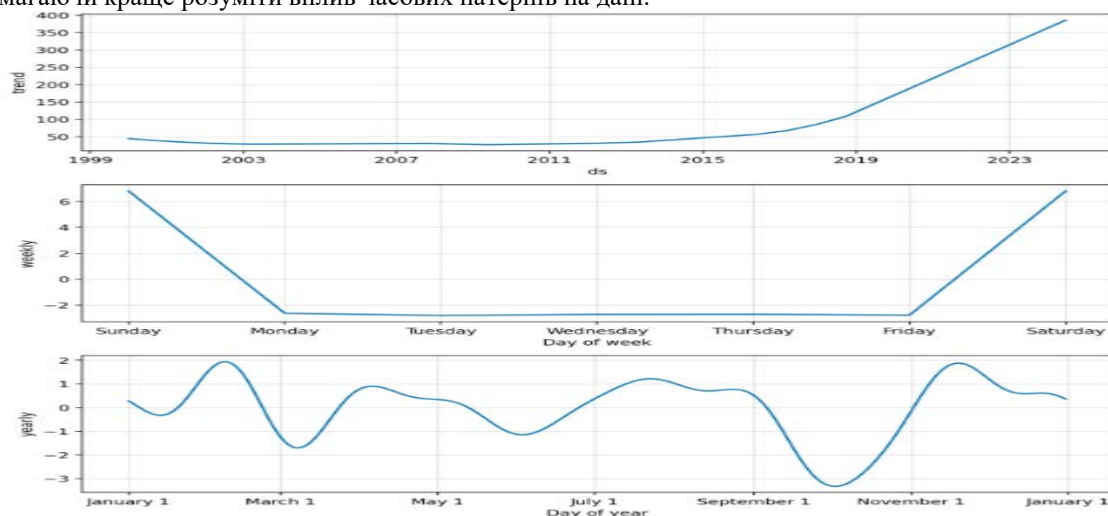


Рисунок 7 – Графіки застосування сезонності в моделі Prophet

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Налаштування сезонності в Prophet дозволяє враховувати регулярні коливання, такі як щотижневі піки, спадання активності та річні тренди. Це покращує точність прогнозів, базуючись на історичних даних, і сприяє розробці інвестиційних стратегій.

Для моделі LSTM дані нормалізуються методом мінмакс, а часові ряди формуються за допомогою віконного аналізу. Додатково створюються ознаки, такі як волатильність, рухомі середні та технічні індикатори (RSI, MACD), що покращують адаптацію до складних фінансових патернів. Ці підходи дозволяють ефективно аналізувати ринкову динаміку та прогнозувати майбутні значення.

Інтелектуальна система виявляє та усуває пропущені значення у наборі даних, що є важливим для забезпечення якості моделі. Виявлення пропусків виконується через аналіз стовпців, а для їх заповнення застосовується метод forward fill, який підставляє останнє відоме значення.

```
with st.expander("Any missing Values?"):  
    st.write(data.isnull().sum())  
    data = data.fillna(method='ffill')  
    st.success("We don't have any missing values!")
```

Система перевіряє наявність пропущених значень і повідомляє користувача про результати. У разі виявлення пропусків застосовується метод forward fill, що забезпечує цілісність даних. Для стандартизації дані нормалізуються, щоб уникнути домінування окремих атрибутів:

```
scaler = StandardScaler()  
data[['Open', 'High', 'Low', 'Close', 'Adj Close', 'Volume']] = scaler.fit_transform(data[['Open', 'High', 'Low', 'Close', 'Adj Close', 'Volume']])
```

Попередня обробка включає перевірку та усунення пропусків методом ffill().bfill() і додавання технічних індикаторів, як-от RSI і SMA, для підвищення інформативності:

```
df['RSI'] = ta.rsi(df['Close'], length=14)  
df['SMA'] = ta.sma(df['Close'], length=9)  
df['RSI'] = ta.rsi(df['Close'], length=14)  
df['SMA'] = ta.sma(df['Close'], length=9)
```

```
df['RSI'] = ta.rsi(df['Close'], length=14)  
df['SMA'] = ta.sma(df['Close'], length=9)
```

Дані масштабуються до діапазону [0, 1] за допомогою MinMaxScaler, що покращує навчання моделі. Для LSTM створюються часові вікна, які враховують послідовності даних для аналізу патернів:

```
for i in range(len(scaled_data) - time_steps):  
    X.append(scaled_data[i:i + time_steps])  
    y.append(scaled_data[i + time_steps, 0])
```

Ці кроки забезпечують підготовку якісних даних для моделей Prophet і LSTM, підвищуючи точність прогнозування та зменшуючи ризики. Результати експериментального дослідження на реальних фінансових даних продемонстрували високу ефективність розробленої системи прогнозування. Зокрема, використання моделі LSTM забезпечило значну перевагу в точності прогнозування (92,4%) порівняно з моделлю Prophet (88,7%). Крім того, застосування методу Монте-Карло для оцінки ризиків надало можливість ідентифікувати потенційні загрози для інвестиційного портфеля, пов'язані з екстремальними змінами вартості активів. Отримані результати свідчать про доцільність та практичну значущість запропонованої системи для прогнозування ситуацій на фінансових ринках.

ВИСНОВКИ

Дослідження спрямоване на розробку інтелектуальної системи прогнозування фінансових рішень щодо динаміки ринкових акцій. Запропонована система інтегрує сучасні методи машинного навчання (Prophet, LSTM) із методом Монте-Карло для оцінки ризиків, що дозволяє підвищити точність прогнозування та ефективність прийняття інвестиційних рішень.

Основні наукові результати:

1. Розроблено інтелектуальну систему, що поєднує етапи збору, обробки та аналізу фінансових даних, побудови прогнозних моделей і комплексної оцінки ризиків.

2. Застосовано сучасні алгоритми машинного навчання (Prophet, LSTM) для моделювання часових рядів фінансових активів, що забезпечило покращення точності прогнозування.

3. Імплементовано метод Монте-Карло для моделювання сценаріїв розвитку ринку та оцінки вартості інвестиційного портфеля в умовах стохастичної невизначеності.

4. Розроблено інтерактивну платформу для аналізу ринкових тенденцій, прогнозування змін

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

курсів акцій та формування аналітичних рекомендацій щодо інвестиційної діяльності.

5. Забезпечено можливість врахування впливу макроекономічних та ринкових факторів на прогнозні моделі.

Розроблена система є ефективним аналітичним інструментом для підтримки прийняття фінансових рішень в умовах високої волатильності ринків. Вона дозволяє:

1. Мінімізувати фінансові ризики та оптимізувати прибутковість інвестиційного портфеля завдяки підвищеній точності прогнозування.

2. Аналізувати ринкові тенденції та формувати обґрунтовані інвестиційні стратегії.

3. Адаптуватися до динамічних змін ринку шляхом врахування зовнішніх макроекономічних факторів.

4. Отримувати конкурентні переваги, використовуючи передові методи штучного інтелекту для аналізу фінансових даних.

Перспективи подальших досліджень:

1. Удосконалення моделей прогнозування шляхом інтеграції складніших нейромережових архітектур та використання глибшого аналізу ринкових факторів.

2. Розширення функціональності системи для моделювання не лише акцій, а й інших фінансових інструментів (облігацій, валют, криптовалют).

3. Розробка адаптивних механізмів навчання, що дозволять системі автоматично оновлюватися відповідно до змін ринкової кон'юнктури.

4. Інтеграція з іншими фінансовими платформами для розширення аналітичних можливостей та підвищення ефективності інвестиційного управління.

Представлені результати підтверджують практичну значущість розробленої системи для інвесторів, фінансових аналітиків та трейдерів, забезпечуючи їм науково обґрунтований підхід до прийняття рішень у складних фінансових умовах.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Hyndman, R. J., & Athanasopoulos, G. (2018). Forecasting: principles and practice. OTexts.
2. Taylor, S. J., & Letham, B. (2018). Forecasting at scale. PeerJ Preprints 6.
3. Bachelet, M. (2019). Financial Econometrics Using Stata. Stata Press.
4. Tsay, R. S. (2018). Analysis of financial time series. John Wiley & Sons.
5. Fischer, T., & Krauss, C. (2018). Deep learning with long short-term memory networks for financial time series forecasting. European Journal of Operational Research, 269(2), 654-669.
6. Lessmann, S., Baesens, B., Seow, H. V., & Thomas, L. C. (2015). Benchmarking state-of-the-art classification algorithms for credit scoring: An update of research. European Journal of Operational Research, 247(1), 124-136.
7. Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. Machine learning, 20(3), 273-297.
8. Livieris, I. K., & Pintelas, P. E. (2019). A LSTM network for stock market forecasting. Expert Systems with Applications, 118, 1-12.
9. Penman, S. H. (2012). Financial statement analysis and security valuation. McGraw-Hill Education.
10. Murphy, J. J. (1999). Technical analysis of the financial markets: A comprehensive guide to trading strategies and techniques. New York Institute of Finance.
11. Bloomberg Terminal. Електронний ресурс. URL: <https://www.bloomberg.com/professional/terminal/> (дата звернення: 2023-11-24).
12. Refinitiv Eikon. Електронний ресурс. URL: <https://www.refinitiv.com/en/products/eikon-desktop> (дата звернення: 2023-11-24).
13. MetaTrader. Електронний ресурс. URL: <https://www.metatrader5.com/en> (дата звернення: 2023-11-24).
14. TradingView. Електронний ресурс. URL: <https://www.tradingview.com/> (дата звернення: 2023-11-24).
15. Yahoo Finance. Електронний ресурс. URL: <https://finance.yahoo.com/> (дата звернення: 2023-11-24).
16. Google Finance. Електронний ресурс. URL: <https://www.google.com/finance> (дата звернення: 2023-11-24).
17. FinTech. Електронний ресурс. URL: <https://www.fintech.com/> (дата звернення: 2023-11-24).

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

18. Zhang, Y., & Li, B. (2020). Stock market prediction based on deep learning neural network. *Neural Processing Letters*, 51(3), 1079-1093.
19. Dash, P. K., & Mishra, A. K. (2021). A novel approach for stock market forecasting using LSTM neural network. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 33(4), 481-489.
20. Sethi, N., & Mittal, M. (2022). Stock price prediction using LSTM and reinforcement learning-based agent. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 13(1), 25-38.

Надійшла до редакції 20.01.2025р.

УГРИН ДМИТРО ІЛІЧ – доктор технічних наук, професор, доцент кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. [e-mail:d.ugryn@chnu.edu.ua](mailto:d.ugryn@chnu.edu.ua)

УШЕНКО ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. [e-mail:y.ushenko@chnu.edu.ua](mailto:y.ushenko@chnu.edu.ua)

ТОМКА ЮРІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. [e-mail:y.tomka@chnu.edu.ua](mailto:y.tomka@chnu.edu.ua)

ГАЗДЮК КАТЕРИНА ПЕТРІВНА – доктор філософії, доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. [e-mail:y.dobrovolsky@chnu.edu.ua](mailto:y.dobrovolsky@chnu.edu.ua)

ДВОРЖАК ВАЛЕНТИНА ВОЛОДИМИРІВНА – кандидат технічних наук, асистент кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. [e-mail:v.dvorzhak@chnu.edu.ua](mailto:v.dvorzhak@chnu.edu.ua)

БІЛОБРИЦЬКИЙ ДЕНИС АНАТОЛІЙОВИЧ - студент-магістрант кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. [e-mail: bilobrytskyi.denys@chnu.edu.ua](mailto:bilobrytskyi.denys@chnu.edu.ua)

D.I. UHRYN, Yu.O. USHENKO, Yu.Ya. TOMKA, K.P. HAZDIUK, V.V. DVORZHAK, D.A.
BILOBRYTSKYI

**AGILE RISK MANAGEMENT METHODOLOGIES IN THE LIFE CYCLE OF AN INTELLIGENT
SYSTEM FOR FORECASTING SOLUTIONS OF MARKET SHARE DYNAMICS**

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 004.8, 004.9

Д.І. УГРИН, Ю.О. УШЕНКО, К.П. ГАЗДЮК, А.Я. ДОВГУНЬ, А.Д. УГРИН, Д.В. КОЗАК

МЕТОДОЛОГІЯ РОЗРОБКИ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ПРОГНОЗУВАННЯ ПРОДАЖІВ ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО УПРАВЛІННЯ

¹Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

²Чернівецький індустріальний фаховий коледж

Анотація. Дослідження присвячене розробці та впровадженню гнучкої методології прогнозування продажів для ефективного управління запасами в магазинах і складських приміщеннях. Запропонована модель базується на методах машинного навчання та враховує змінні ринкові умови, дозволяючи адаптивно оновлювати прогнози. Основні етапи дослідження включають аналіз існуючих методів прогнозування, вибір алгоритмів машинного навчання, розробку прототипу моделі та оцінку її точності й економічного ефекту. Для реалізації моделі використовувався фреймворк AutoML .NET, який забезпечує автоматичний підбір найефективніших алгоритмів і гіперпараметрів. Результати експериментів з навчання моделей на наборах даних різного обсягу продемонстрували високу точність прогнозування за допомогою алгоритмів FastTree, FastForest, SDCA та LightGBM. Також було досліджено ефективність різних стратегій оптимізації параметрів, що дозволяє адаптувати модель до нових ринкових змін. Запропонована методологія сприяє зниженню ризиків у процесі управління запасами, підвищенню ефективності бізнес-процесів та мінімізації витрат, пов'язаних із надлишковими або дефіцитними запасами.

Ключові слова: прогнозування продажів, машинне навчання, управління запасами, AutoML .NET, управління ризиками, оптимізація.

Abstract. The study is devoted to the development and implementation of a flexible sales forecasting methodology for efficient inventory management in stores and warehouses. The proposed model is based on machine learning methods and takes into account changing market conditions, allowing for adaptive forecast updates. The main stages of the research include analysing existing forecasting methods, selecting machine learning algorithms, developing a prototype model, and evaluating its accuracy and economic effect. To implement the model, the AutoML .NET framework was used, which provides automatic selection of the most efficient algorithms and hyperparameters. The results of model training experiments on data sets of different sizes demonstrated high forecasting accuracy using FastTree, FastForest, SDCA, and LightGBM algorithms. The effectiveness of various parameter optimisation strategies was also investigated, allowing the model to adapt to new market changes. The proposed methodology helps to reduce risks in the inventory management process, increase the efficiency of business processes and minimise costs associated with excess or shortage stocks.

Keywords: sales forecasting, machine learning, inventory management, AutoML .NET, risk management, optimisation.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-123-134

ВСТУП

У сучасних умовах динамічного розвитку ринку та зростаючих вимог до оптимізації бізнес-процесів ефективне управління запасами набуває критичного значення для підприємств, що працюють у сферах торгівлі та логістики. Конкурентний тиск, нестабільність попиту та необхідність оперативного реагування на зміни диктують потребу у впровадженні точних методів прогнозування продажів. Це, у свою чергу, дозволяє мінімізувати ризики, що пов'язані з надмірними або недостатніми запасами товарів. Інтеграція адаптивних методологій управління ризиками та використання сучасних інформаційних технологій забезпечує ефективне поєднання функцій прогнозування продажів у системах управління товарно-матеріальними цінностями магазинів і складських приміщень.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Одним із найперспективніших напрямків вирішення цієї проблеми є застосування технологій машинного навчання, що дозволяють створювати автоматизовані, високоточні та адаптивні моделі прогнозування. Аналізуючи великі обсяги різномірних даних, такі моделі враховують широкий спектр чинників, включаючи сезонні коливання, макроекономічні тенденції, поведінку споживачів, ефективність маркетингових кампаній та інші зовнішні впливи. Це сприяє оптимізації процесів закупівлі, скороченню витрат на зберігання товарів та підвищенню рівня обслуговування клієнтів.

Однак впровадження таких моделей супроводжується низкою ризиків, які охоплюють як технологічні аспекти (якість вхідних даних, складність інтеграції з існуючими інформаційними системами, потенційна нестабільність алгоритмів), так і організаційні фактори (опір змінам, дефіцит кваліфікованих фахівців, ризик прийняття необґрунтованих управлінських рішень на основі прогнозних даних). У цьому контексті використання гнучких методологій управління ризиками є ключовим для успішного впровадження систем прогнозування продажів. Адаптивні підходи забезпечують швидке реагування на зміну ринкової ситуації, мінімізацію ймовірності критичних помилок і ефективну інтеграцію інноваційних рішень у бізнес-процеси підприємства.

З огляду на це, розробка моделі генерації моделей машинного навчання для прогнозування обсягів продажів у системах управління товарно-матеріальними цінностями магазинів і складських приміщень є актуальним і важливим завданням. У рамках цього дослідження буде здійснено детальний аналіз предметної області, розглянуто існуючі аналогічні рішення, розроблено концептуальну архітектуру системи та визначено ключові аспекти її інтеграції в бізнес-процеси підприємств. Використання запропонованих технологічних рішень не лише підвищить точність прогнозування та мінімізує ризики, а й сприятиме створенню стійких конкурентних переваг, що забезпечать стабільний розвиток та підвищення операційної ефективності в умовах сучасного ринку.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ ТА АНАЛОГІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

У сучасному швидко змінюваному корпоративному середовищі ефективне управління запасами виступає важливим фактором для досягнення конкурентоспроможності підприємств [1, 2, 3]. Незалежно від розміру та галузі, компанії намагаються забезпечити оптимальний контроль над запасами, що дозволяє їм оперативно задовольняти попит споживачів, уникати дефіциту товарів, зменшувати витрати на зберігання та транспортування, а також удосконалювати логістичні процеси [4, 5]. Впровадження програмних рішень для управління запасами дає змогу автоматизувати ключові бізнес-процеси та приймати рішення на основі аналізу даних [6, 7, 8].

Гнучкі методології управління ризиками у прогнозуванні продажів сприяють ефективному плануванню інвентаризації та мінімізації невизначеності [9, 10]. Використання інтелектуального аналізу даних і алгоритмів машинного навчання дозволяє підвищити точність прогнозів, що критично важливо для підприємств, що працюють у динамічних ринкових умовах [11, 12]. Таким чином, дослідження гнучких підходів до прогнозування продажів у системах управління запасами сприятиме підвищенню ефективності бізнес-процесів і формуванню конкурентних переваг.

Вивчення сучасних підходів до управління запасами охоплює широкий спектр наукових і практичних досліджень [13, 14]. У багатьох роботах розглядаються методи прогнозування попиту, автоматизація процесів управління запасами та інтеграція інформаційних систем у ланцюги постачання [15, 16]. Дослідження, опубліковані в аналітичних звітах Forbes [17], свідчать про значну роль цифрових технологій в оптимізації управління запасами, особливо у сфері електронної комерції та складської логістики.

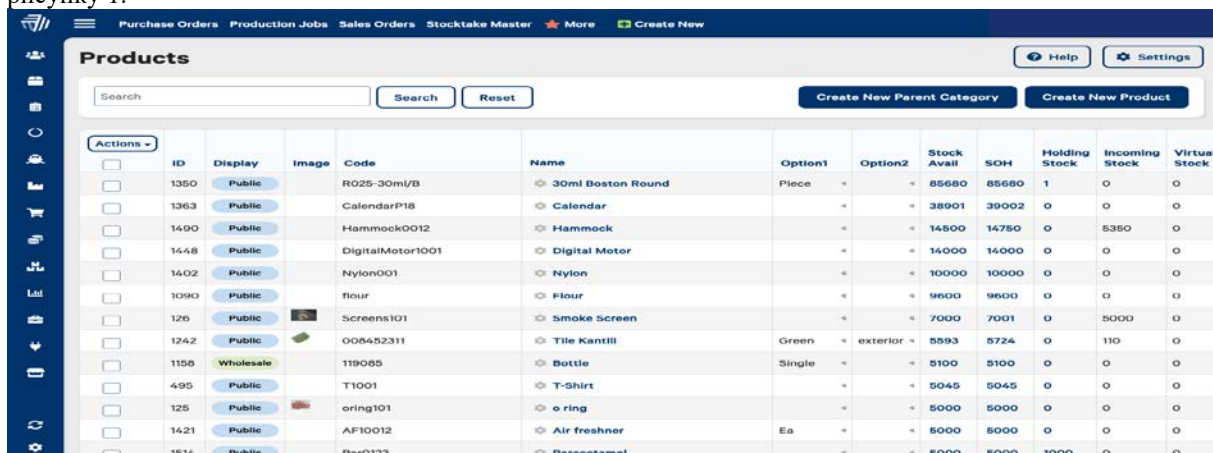
Програмні рішення, такі як Cin7, Ordoro та inFlow, є лідерами у сфері управління запасами. Cin7 забезпечує автоматизоване відстеження рівнів запасів і закупівель, Ordoro спеціалізується на багатоканальному управлінні запасами для онлайн-продажів, а inFlow орієнтований на B2B-компанії та пропонує інструменти для оптових постачальників [18]. Впровадження цих рішень дозволяє знизити операційні витрати та покращити ефективність управління запасами.

Сучасні методи прогнозування, такі як моделі машинного навчання, регресійний аналіз та нейронні мережі, використовуються для підвищення точності передбачення попиту [19, 20]. Зокрема, адаптивні моделі враховують сезонність, тенденції ринку та поведінку споживачів, що дозволяє компаніям зменшити ризики, пов'язані з надмірним запасом або дефіцитом товарів.

Аналіз існуючих рішень показує, що багато компаній впроваджують спеціалізовані системи управління запасами для оптимізації операційної діяльності [21]. Наприклад, Cin7 пропонує широкий

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

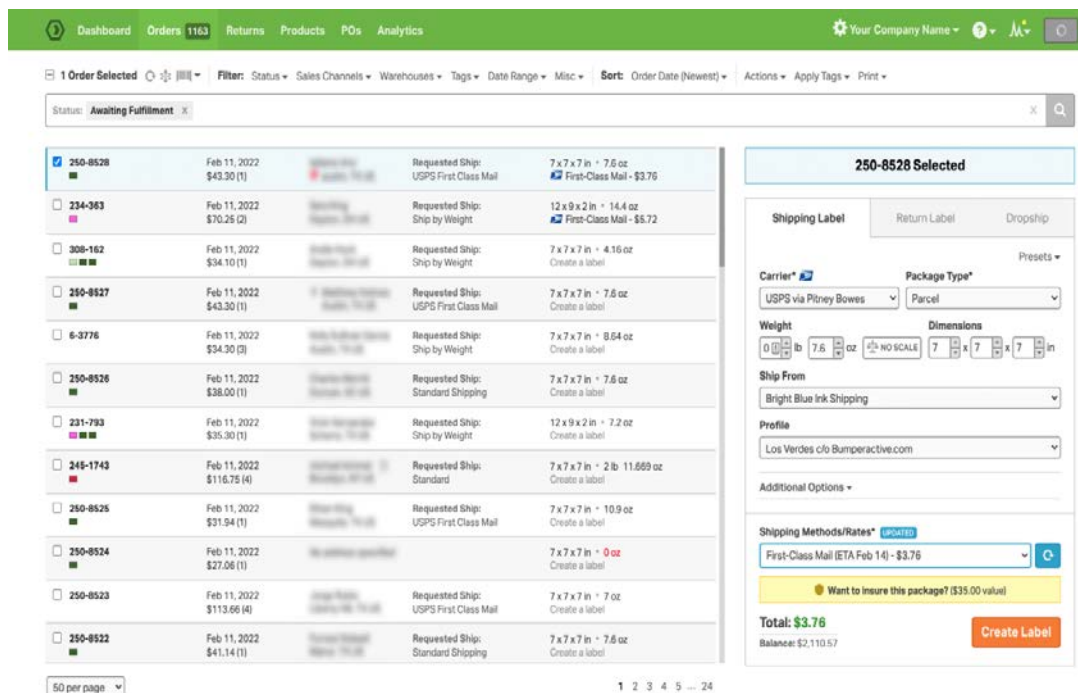
набір функцій для автоматизації складських процесів та управління закупівлями, що дозволяє компаніям ефективно контролювати рівень запасів та прогнозувати попит [22]. Інтерфейс Cin7 представлений на рисунку 1.



Actions	ID	Display	Image	Code	Name	Option1	Option2	Stock Avail	SOH	Holding Stock	Incoming Stock	Virtual Stock
☐	1350	Public		R025-30ml/B	30ml Boston Round	Piece		85680	85680	1	0	0
☐	1363	Public		CalendarP18	Calendar			38901	39002	0	0	0
☐	1400	Public		Hammock0012	Hammock			14500	14750	0	5350	0
☐	1448	Public		DigitalMotor1001	Digital Motor			14000	14000	0	0	0
☐	1402	Public		Nylon001	Nylon			10000	10000	0	0	0
☐	1090	Public		flour	Flour			9600	9600	0	0	0
☐	126	Public		Screens101	Smoke Screen			7000	7001	0	5000	0
☐	1242	Public		008452311	Tile Kantill	Green	exterior	5593	5724	0	110	0
☐	1158	Wholesale		119085	Bottle	Single		5100	5100	0	0	0
☐	495	Public		T1001	T-Shirt			5045	5045	0	0	0
☐	125	Public		oring101	e ring			5000	5000	0	0	0
☐	1421	Public		AF10012	Air freshner	Ea		5000	5000	0	0	0
☐	1514	Public		Par0123	Paracetamol			5000	5000	1000	0	0

Рисунок 1 – Спеціалізована система управління запасами Cin7 для оптимізації операційної діяльності

Ordoro забезпечує інтеграцію з платформами електронної комерції, що робить його ідеальним рішенням для багатоканальних роздрібних продажів. Ordoro [23] є одним із найкращих багатоканальних рішень для управління запасами. Це програмне забезпечення поєднує синхронізацію рівня запасів і статусу доставки в реальному часі з більшістю платформ електронної комерції та онлайн-ринків. Серед основних переваг Ordoro – це можливість оформлення замовлень на купівлю одним клацанням миші, а також автоматизація процесу закупівель, яка ґрунтується на даних про повторні замовлення або прогнози продажів. Ordoro є ідеальним вибором для компаній, що працюють з товарами на замовлення, індивідуальними виробами та підписками, оскільки має функціонал комплектування, що дозволяє відстежувати відвантаження сировини та компонентів до товарів, готових до відправлення. Візуальний інтерфейс Ordoro наведено на рисунку 2.



Dashboard Orders 1163 Returns Products POs Analytics

1 Order Selected Filter: Status Sales Channels Warehouses Tags Date Range Misc Sort: Order Date (Newest) Actions Apply Tags Print

Status: Awaiting Fulfillment

ID	Date	Price	Requested Ship	Weight	Dimensions
250-8528	Feb 11, 2022	\$43.30 (1)	USPS First Class Mail	7.6 oz	7 x 7 x 7 in
234-363	Feb 11, 2022	\$70.25 (2)	USPS First Class Mail	14.4 oz	12 x 9 x 2 in
308-162	Feb 11, 2022	\$34.10 (1)	USPS First Class Mail	4.16 oz	7 x 7 x 7 in
250-8527	Feb 11, 2022	\$43.30 (1)	USPS First Class Mail	7.6 oz	7 x 7 x 7 in
6-3776	Feb 11, 2022	\$34.30 (3)	USPS First Class Mail	8.64 oz	7 x 7 x 7 in
250-8526	Feb 11, 2022	\$38.00 (1)	USPS First Class Mail	7.6 oz	7 x 7 x 7 in
231-793	Feb 11, 2022	\$35.30 (1)	USPS First Class Mail	7.2 oz	12 x 9 x 2 in
245-1743	Feb 11, 2022	\$116.75 (4)	USPS First Class Mail	11.689 oz	7 x 7 x 7 in
250-8525	Feb 11, 2022	\$31.94 (1)	USPS First Class Mail	10.9 oz	7 x 7 x 7 in
250-8524	Feb 11, 2022	\$27.06 (1)	USPS First Class Mail	0 oz	7 x 7 x 7 in
250-8523	Feb 11, 2022	\$113.66 (4)	USPS First Class Mail	7 oz	7 x 7 x 7 in
250-8522	Feb 11, 2022	\$41.14 (1)	USPS First Class Mail	7.6 oz	7 x 7 x 7 in

50 per page

250-8528 Selected

Shipping Label Return Label Dropship

Carrier* USPS via Pitney Bowes Package Type* Parcel

Weight 7.6 oz Dimensions 7 x 7 x 7 in

Ship From Bright Blue Ink Shipping

Profile Los Verdes c/o Bumperactive.com

Shipping Methods/Rates* First-Class Mail (ETA Feb 14) - \$3.76

Total: \$3.76 Balance: \$2,110.57

Create Label

Рисунок 2 – Багатофункціональне програмне забезпечення Ordoro для управління запасами та автоматизації логістики

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

InFlow пропонує унікальні можливості для B2B-сегменту, включаючи управління віртуальними виставковими залами та котируванням цін. inFlow [2, 22] є оптимальним рішенням для B2B та оптових компаній. Він надає всі стандартні функції управління запасами, а також спеціалізовані можливості, що підходять для B2B і оптових підприємств. Наприклад, користувачі inFlow можуть вибирати, які елементи інвентарю використовувати для створення віртуальних виставкових залів і визначати, яку інформацію різні клієнти побачать. Крім того, система підтримує котирування B2B, виставлення рахунків, маршрутизацію замовлень торгових представників та управління робочими процесами у промисловому виробництві. Візуальний інтерфейс inFlow представлений на рисунку 3.

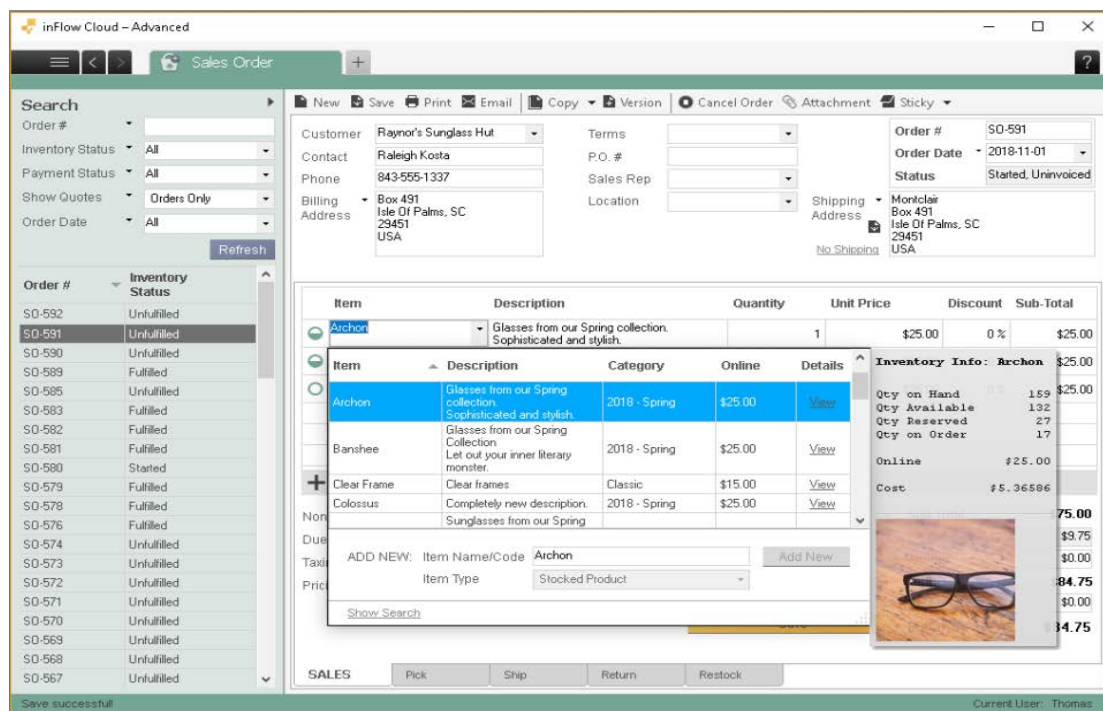


Рисунок 3 – Програмне забезпечення inFlow для управління запасами

Попередні дослідження у сфері гнучкого управління ризиками в прогнозуванні продажів демонструють, що використання аналітичних платформ та інтелектуальних систем дозволяє зменшити втрати, пов'язані з невірними прогнозами [9, 11]. Наприклад, системи, що використовують нейронні мережі та алгоритми штучного інтелекту, можуть адаптуватися до змін у попиті та автоматично коригувати стратегії управління запасами.

Таким чином, подальше дослідження гнучких методологій управління ризиками прогнозування продажів у системах управління запасами дозволить розробити ефективні інструменти для підвищення точності передбачень, зниження витрат і покращення ефективності роботи компаній у сфері роздрібної та оптової торгівлі.

2. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ТА ЦІЛІ ДОСЛІДЖЕННЯ

У сучасних умовах бізнес-середовища, де ризики зміни попиту та коливань ринку стають дедалі важливішими, гнучке управління прогнозами продажів у системах управління інвентарем є критично важливим для ефективної роботи магазинів і складських приміщень. Враховуючи ці фактори, зростає необхідність у розробці методологій, що здатні адаптуватися до швидко змінюваних умов, таких як зміни попиту, сезонність, і невизначеність. У цьому контексті важливим аспектом є створення модулів прогнозування продажів, що базуються на використанні машинного навчання, з акцентом на гнучкість і адаптивність прогнозних моделей.

Задача даного дослідження полягає в розробці та реалізації гнучкої методології прогнозування продажів для систем управління інвентарем магазинів та складських приміщень. Модель, що буде

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

розроблена, повинна автоматично генерувати методи прогнозування продажів на основі історичних даних про запаси та обсяги продажів, з урахуванням динамічних змін попиту. Це дозволить підприємствам оперативно адаптувати свої стратегії управління запасами, знижуючи ризики надлишкових або дефіцитних товарів і покращувати ефективність процесів закупівель та логістики.

Модель має використовувати різноманітні методи машинного навчання, зокрема лінійну регресію та дерева рішень (Random Forest, Gradient Boosting), що дозволить забезпечити високу точність прогнозів, а також гнучкість у налаштуванні моделей в залежності від змін у даних або умовах ринку. Крім того, для забезпечення стабільності та точності прогнозів необхідно буде застосовувати методи валідації, такі як перехресна валідація та оптимізація гіперпараметрів.

Метою дослідження є розробка та впровадження гнучкої методології прогнозування продажів, що буде адаптуватися до змінних умов ринку, для ефективного управління запасами у магазинах та складських приміщеннях. Модель прогнозування продажів повинна забезпечити точні прогнози, сприяти оптимізації запасів та зниженню ризиків у процесах управління інвентарем.

На основі мети виділяються цілі дослідження:

1. Розробити гнучку методологію прогнозування продажів, яка адаптується до змінюваних умов ринку та дозволяє враховувати різноманітні фактори ризику;
2. Вивчити ефективність застосування методів машинного навчання для прогнозування продажів у сфері управління інвентарем;
3. Оцінити вплив різних алгоритмів на точність прогнозів та їх здатність до адаптації до нових даних;
4. Розробити систему для автоматичного перенавчання моделей на нових даних, що дозволяє оперативно реагувати на зміни в умовах попиту;
5. Оцінити економічний ефект від інтеграції розробленої моделі прогнозування у систему управління запасами.

Ключові етапи дослідження:

1. Аналіз сучасних підходів до прогнозування продажів і оцінки ризиків в управлінні запасами;
2. Формулювання задачі та вимог до моделі прогнозування продажів, з урахуванням специфіки управління інвентарем;
3. Вибір методів машинного навчання та проектування алгоритму роботи моделі з фокусом на гнучкість і адаптивність;
4. Розробка прототипу моделі прогнозування та інтеграція його в існуючі системи управління запасами;
5. Оцінка точності прогнозів і економічного ефекту від використання гнучкої методології для управління ризиками в управлінні запасами.

Це дослідження має на меті не лише розробку інноваційної моделі прогнозування продажів, а й створення ефективної гнучкої методології, що дозволить підприємствам знижувати ризики і підвищувати ефективність операцій, що пов'язані з управлінням інвентарем у складських приміщеннях і магазинах.

3. МАТЕРІАЛИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА МЕТОДИ

Розробка та навчання моделі машинного навчання є складним та багатоступеневим процесом, що включає кілька ключових етапів. Кожен з цих етапів має важливе значення для досягнення оптимальних результатів.

Процес реалізації моделі складається з наступних етапів:

1. Збір історичних даних замовлень. На цьому етапі здійснюється отримання історії замовлень користувачів з бази даних. Ці дані слугуватимуть основою для формування початкового набору даних, необхідного для подальшого навчання моделі.
2. Обробка та підготовка даних. Дані підлягають обробці, в процесі якої відбираються лише релевантні поля і рядки, які важливі для навчання моделі. Проводиться трансформація даних у формат, що підходить для подальшого використання у навчанні.
3. Передача даних у модель створення методів. Підготовлені дані конвертуються в необхідний формат і передаються на обробку до моделі, яка займається створенням моделей машинного навчання.
4. Підбір алгоритму та моделі для оптимальних результатів. За допомогою фреймворку .NET AutoML, модель починає тестувати різні алгоритми та налаштування, щоб визначити найбільш підходящу конфігурацію для моделі.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

5. Навчання моделі на обраних даних та алгоритмі. На цьому етапі обраний метод машинного навчання тренується на підготовлених даних з використанням обраного алгоритму.

6. Збереження моделі для подальшого використання. Після навчання модель зберігається, що дає змогу користувачам використовувати її для генерації прогнозів щодо можливих продажів товарів у майбутньому.

Цей процес забезпечує ефективне створення та впровадження методів машинного навчання, здатних робити точні прогнози для оптимізації процесів управління запасами. Діаграма процесу створення моделі наведена на рисунку 4.

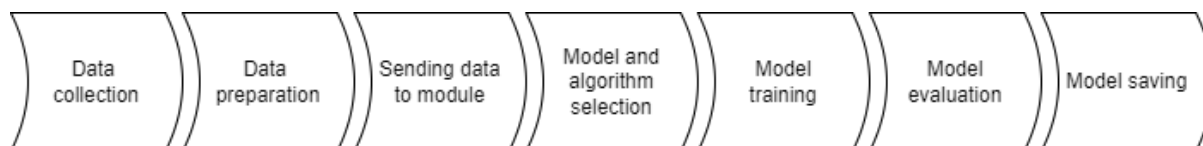


Рисунок 4 – Діаграма процесу створення моделі

Модуль генерації моделей машинного навчання оснащений набором алгоритмів з фреймворку Auto.ML .NET. Цей модуль використовує метод підбору алгоритмів та їх гіперпараметрів для визначення найбільш ефективної моделі, яка найкраще підходить для прогнозування продажів на основі існуючих даних про продажі користувача. Модуль підтримує широкий спектр алгоритмів [14], серед яких вибирається найоптимальніший для конкретного набору даних:

1. FastTree – ансамблевий деревоподібний алгоритм, оптимізований для задач регресії. Він ефективно працює з великими наборами даних, де є нелінійні зв'язки, і часто демонструє високу точність для складних задач регресії.

2. FastForest – алгоритм випадкового лісу, який створює кілька дерев рішень. Підходить для наборів даних з шумом або відсутніми значеннями та може ефективно працювати з нелінійними зв'язками.

3. SDCA – алгоритм лінійної регресії, який є оптимальним для простих наборів даних з лінійними зв'язками. Показує високу ефективність при роботі з великими наборами даних і розрідженими ознаками.

4. LightGBM – платформа градієнтного підвищення від Microsoft, відома своєю швидкістю та ефективністю при роботі з великими об'ємами даних. Добре справляється з обробкою як категоріальних, так і числових ознак.

Розроблений модуль генерації моделей машинного навчання у фреймворку Auto.ML .NET, який включає набір алгоритмів, призначених для вибору оптимальних моделей та їх гіперпараметрів для передбачення продажів на основі існуючих даних користувача. Цей модуль застосовує широкий спектр алгоритмів [11, 13], щоб визначити найкращий підходящий для конкретного набору даних:

1. FastTree: алгоритм деревоподібного ансамблю, оптимізований для регресії, ефективний для обробки великих наборів даних з нелінійними зв'язками.

2. FastForest: алгоритм випадкового лісу, що створює кілька дерев рішень, добре працює з даними з шумом або відсутніми значеннями.

3. SDCA: алгоритм лінійної регресії, найкраще підходить для простих наборів даних з лінійними зв'язками та ефективний з великими розрідженими даними.

4. LightGBM: платформа підвищення градієнта від Microsoft, відома своєю швидкістю та ефективністю обробки великих категоріальних та числових характеристик.

Auto.ML .NET містить широкий набір тюнерів [12-14], що дозволяють автоматично підбирати оптимальні гіперпараметри для передбачення значень:

1. Cost Frugal Tuner – реалізує економну оптимізацію гіперпараметрів з урахуванням вартості навчання.

2. Eci Cost Frugal Tuner – варіант Cost Frugal Tuner, адаптований для ієрархічних просторів пошуку; використовується як тюнер за замовчуванням у AutoML.

3. SMAC – тюнер, що застосовує байєсівську оптимізацію на основі випадкових лісів.

4. Grid Search – ефективний для невеликих просторів пошуку.

5. Випадковий пошук – здійснює випадковий підбір гіперпараметрів.

Для кожного алгоритму модуль індивідуально визначає оптимальні гіперпараметри за допомогою AutoML. Усі параметри алгоритмів наведені в таблиці 1.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Таблиця 1

Гіперпараметри алгоритмів модуля

Алгоритм	Гіперпараметри	Вплив тюнера
FastTree	Кількість дерев	Число дерев у складі ансамблю рішень.
	Гранична глибина дерева.	Обмежує розмір дерева для запобігання перенавчанню.
	Швидкість навчання	Знижує вплив кожного окремого дерева.
	Частка ознак	Частка характеристик, задіяних у формуванні дерева.
	Мінімальне прирощення при розділенні.	Мінімальне збільшення, необхідне для поділу вузла.
FastForest	Кількість дерев	Загальна кількість дерев.
	Максимальна глибина	Гранична глибина кожного окремого дерева.
	Кількість листків	Допустима максимальна глибина кожного дерева.
LightGBM	Кількість листків	Регулює складність кожного дерева.
	Швидкість навчання	Вплив кожного дерева на загальну модель.
	Мінімальні дані в листку	Мінімальна кількість прикладів, що вимагаються в листі.
	Частка ознак	Частка функцій, що використовуються в кожній ітерації.
SDCA	Нормалізація L2	Накладає штраф на великі ваги для запобігання перенавчанню.
	L1 Регуляризація.	Сприяє розрідженості моделі.
	Допуск конвергенції	Визначає момент, коли оптимізація завершується.

Для підвищення ефективності навчання моделей та запобігання перенавчанню (overfitting), коли модель надмірно пристосовується до тренувальних даних і втрачає здатність до узагальнення, у модулі та фреймворку Auto.ML .NET використовується метод перехресної перевірки (cross-validation). Цей підхід дає змогу оцінювати продуктивність моделі, тестуючи її на різних підмножинах даних, що сприяє отриманню більш стабільних і надійних результатів.

Auto.ML .NET підтримує різні метрики для оцінки ефективності моделі, зокрема:

1. RSquared (R^2) – показник, що відображає, наскільки добре модель пояснює варіацію залежної змінної. Він вимірює частку варіації, яку модель здатна пояснити, у порівнянні із загальною варіацією у вихідних даних. Вищі значення R^2 свідчать про гарну адаптацію моделі до даних, однак занадто високі показники можуть вказувати на перенавчання.

2. RMSE (Root Mean Square Error) – середнє квадратичне відхилення, яке відображає середню похибку прогнозів моделі. Чим нижче значення RMSE, тим точніші передбачення. Ця метрика особливо корисна для оцінки регресійних моделей.

3. MSE (Mean Square Error) – середнє квадратичне відхилення між фактичними та прогнозованими значеннями. Подібно до RMSE, ця метрика допомагає оцінити точність прогнозів, але через квадратичну форму є більш чутливою до значних похибок.

Під час генерації моделі вибір найнадійнішого варіанту здійснюється на основі однієї з зазначених метрик. Для визначення оптимальної моделі було проведено експерименти із навчанням моделей на двох різних наборах даних. Кожен набір використовувався для створення окремих моделей, що оцінювалися за різними метриками. У дослідженні розглядалися два набори даних: один містив 25 000 записів, інший – 5 000 записів.

На рисунку 5 представлено результати генерації моделі, навченої на наборі з 25 000 записів із використанням метрики RSquared для вибору найбільш надійної моделі.

```

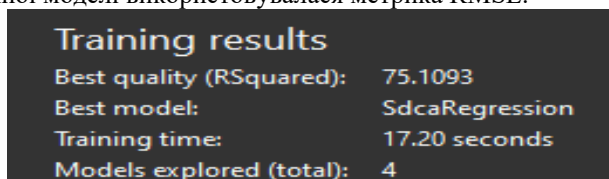
Training results
Best quality (RSquared): 0.9430
Best model:             LightGbmRegression
Training time:          19.38 seconds
Models explored (total): 7

```

Рисунок 5 – Експеримент №1 із використанням метрики RSquared для вибору найбільш надійної моделі

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

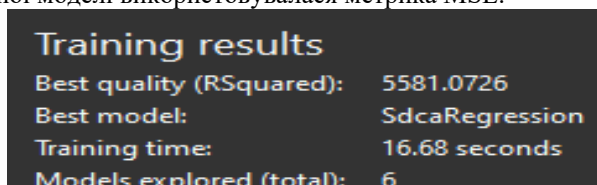
На рисунку 6 представлено результати генерації моделі на основі набору даних із 25 000 записів, де для вибору найбільш надійної моделі використовувалася метрика RMSE.



Training results	
Best quality (RSquared):	75.1093
Best model:	SdcaRegression
Training time:	17.20 seconds
Models explored (total):	4

Рисунок 6 – Експеримент №2 для метрики RMSE

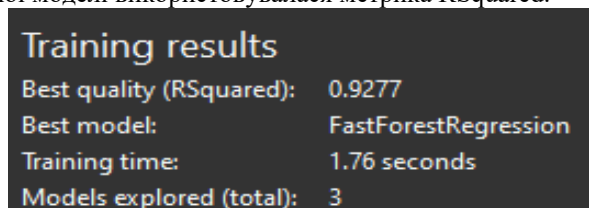
На рисунку 7 представлено результати генерації моделі на основі набору даних із 25 000 записів, де для вибору найбільш надійної моделі використовувалася метрика MSE.



Training results	
Best quality (RSquared):	5581.0726
Best model:	SdcaRegression
Training time:	16.68 seconds
Models explored (total):	6

Рисунок 7 – Експеримент №3 для вибору найбільш надійної моделі з використанням метрики MSE

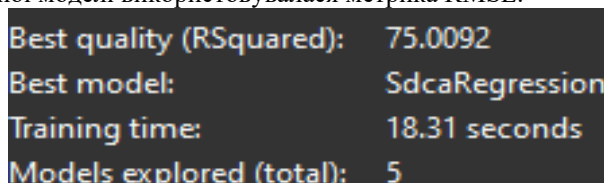
На рисунку 8 представлено результати генерації моделі на основі набору даних із 5 000 записів, де для вибору найбільш надійної моделі використовувалася метрика RSquared.



Training results	
Best quality (RSquared):	0.9277
Best model:	FastForestRegression
Training time:	1.76 seconds
Models explored (total):	3

Рисунок 8 – Експеримент №4

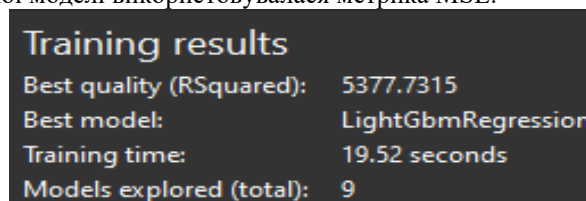
На рисунку 9 представлено результати генерації моделі на основі набору даних із 5 000 записів, де для вибору найбільш надійної моделі використовувалася метрика RMSE.



Best quality (RSquared):	75.0092
Best model:	SdcaRegression
Training time:	18.31 seconds
Models explored (total):	5

Рисунок 9 – Експеримент №5

На рисунку 10 представлено результати генерації моделі на основі набору даних із 5 000 записів, де для вибору найбільш надійної моделі використовувалася метрика MSE.



Training results	
Best quality (RSquared):	5377.7315
Best model:	LightGbmRegression
Training time:	19.52 seconds
Models explored (total):	9

Рисунок 10 – Експеримент №6

Усі розглянуті метрики (RSquared, RMSE, MSE) демонструють високу ефективність та надають цінну інформацію для оцінки продуктивності моделі. Проте, за підсумками проведених експериментів, основною метрикою було обрано RSquared, оскільки вона забезпечує дещо вищу надійність. Ця метрика дозволяє краще оцінити, наскільки точно модель пояснює варіацію даних, а також дає чіткіше уявлення про її прогностичні можливості. Завдяки цьому RSquared було визначено як оптимальний вибір для підвищення якості моделювання.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Результати експериментів із використанням різних метрик на двох наборах даних, що відрізняються за розміром та складом, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

Підсумки проведених експериментів

№	Кількість записів	Метрика оцінки	Отримана модель	Результат	Надійність моделі
1	25000	RSquared	LightGbmRegression	0.9430	94.3%
2	25000	RMSE	SdcaRegression	75.1093	92.5%
3	25000	MSE	SdcaRegression	5581.0726	92.5%
4	5000	RSquared	FastForestRegression	0.9277	92.77%
5	5000	RMSE	SdcaRegression	75.0092	92.5%
6	5000	MSE	LightGbmRegression	5377.7315	92.67%

На основі проведених експериментів проведено ряд досліджень прогнозування продаж у системі управління інвентарем магазинів та складських приміщень. На рисунку 11 представлено відображення історичних даних для ноутбуків. Синя лінія показує вже наявні історичні дані, тоді як зелена, червона та оранжева лінії відображають прогнози на три місяці вперед, отримані від трьох різних моделей, натренованих із використанням різних метрик оцінки надійності.

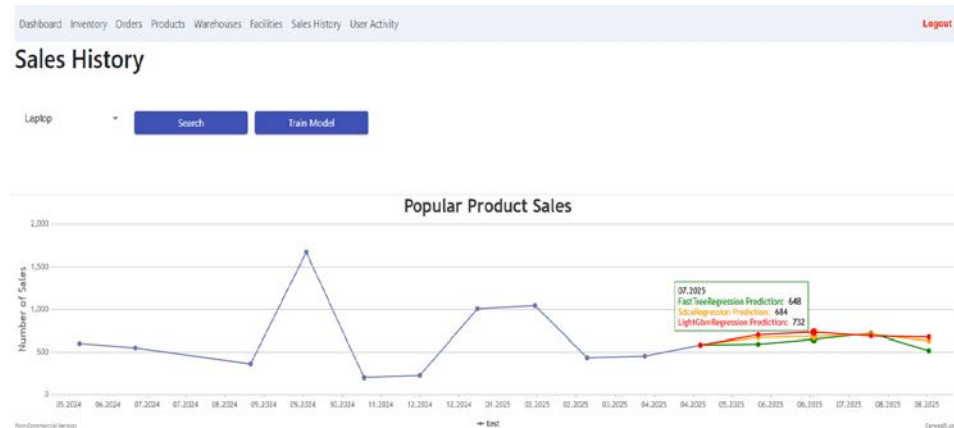


Рисунок 11 – Історія продажів ноутбуків із прогнозуванням

На рисунку 12 представлена відображення історичних даних для холодильників.

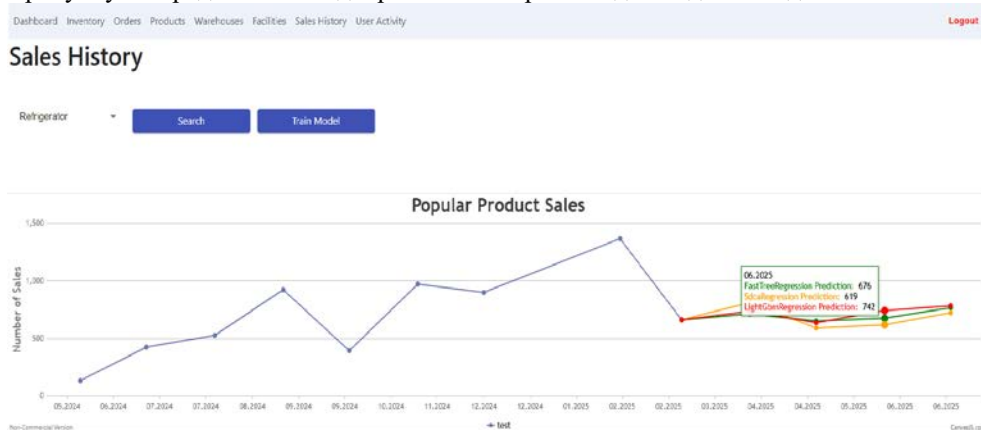


Рисунок 12 – Історія продажів холодильників з передбаченням

На рисунку 13 зображено вкладку з відображенням історичних даних для оливкової олії.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

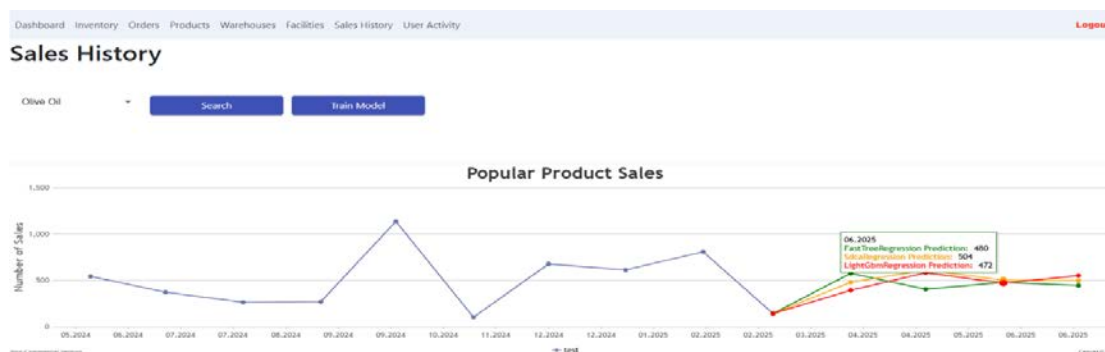


Рисунок 13 – Історія продажів оливкової олії із прогнозуванням

Проведені експериментальні дослідження дозволили оцінити ефективність застосування різних метрик оцінки продуктивності моделей прогнозування (коефіцієнт детермінації R^2 , середньоквадратичне відхилення RMSE, середньоквадратична помилка MSE) у контексті управління ризиками. На основі порівняльного аналізу, коефіцієнт детермінації R^2 був визначений як основна метрика, що забезпечує найвищу надійність оцінки здатності моделі пояснювати дисперсію даних, що є критично важливим для мінімізації ризиків, пов'язаних з прогнозуванням.

Експерименти були проведені на двох незалежних наборах даних (25 000 та 5 000 записів), з використанням ряду моделей машинного навчання, включаючи LightGBM Regression, SDCA Regression та Fast Forest Regression. Підсумкові результати, представлені в Таблиці 2, демонструють, що найбільш надійні моделі досягають рівня точності до 94,3%, що свідчить про ефективність застосованих підходів до прогнозування.

Розроблені моделі дозволили здійснювати прогнозування обсягів продажів у системі управління інвентарем магазинів та складських приміщень. Візуалізація результатів, представлена на рисунках 11–13, відображає історичні дані та прогнозовані значення для різних категорій товарів (ноутбуки, холодильники та оливкова олія) на тримісячний період. Застосування різних підходів до моделювання дозволило оцінити їх вплив на точність прогнозування та ефективність управління ризиками, що пов'язані з товарними запасами.

ВИСНОВКИ

На основі проведеного дослідження сформульовано такі наукові висновки:

1. Розроблено адаптивну методологію прогнозування продажів, що враховує динамічні зміни ринкового середовища та забезпечує ефективне управління запасами в магазинах і складських приміщеннях. Використання методів машинного навчання дозволяє підвищити гнучкість моделі, забезпечуючи її адаптацію до нових даних і можливість врахування факторів ризику.

2. Інтеграція фреймворку .NET AutoML дозволила автоматизувати процес вибору оптимальних алгоритмів і налаштування їхніх гіперпараметрів, що сприяло прискоренню та спрощенню розробки моделей прогнозування. Впроваджений модуль генерації моделей підтримує широкий спектр алгоритмів (FastTree, FastForest, SDCA, LightGBM) та методів оптимізації (Cost Frugal Tuner, Eci Cost Frugal Tuner, SMAC, Grid Search, випадковий пошук), що забезпечує високу варіативність підходів до аналізу даних.

3. Метод перехресної перевірки (cross-validation) сприяв покращенню якості моделей, мінімізуючи ризик перенавчання, що забезпечило більш стабільні та надійні прогностичні результати.

4. Порівняльний аналіз метрик оцінки ефективності моделей (RSquared, RMSE, MSE) продемонстрував, що коефіцієнт детермінації (RSquared) є найбільш достовірним критерієм для оцінки якості прогнозування. Результати експериментів на двох вибірках даних засвідчили високу ефективність запропонованого підходу, досягаючи рівня надійності моделей до 94,3%.

5. Розроблені моделі прогнозування були інтегровані в систему управління інвентарем, що дало змогу здійснювати прогнозування продажів для різних категорій товарів (ноутбуки, холодильники, оливкова олія) на три місяці вперед. Візуалізація результатів підтверджує практичну цінність методології для оптимізації управління запасами та зниження ризиків надмірного або недостатнього постачання товарів. Отже, результати дослідження підтверджують ефективність розробленої методології прогнозування продажів і її значний потенціал для підвищення ефективності управління запасами в підприємницьких структурах.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Биков В.Ю. Управління ризиками в корпоративних інформаційних системах. – К.: Наукова думка, 2016. – 240 с.
2. Гнатенко О.В. Методи прогнозування продаж: теорія і практика. – Львів: Видавничий дім «АртЕк», 2018. – 320 с.
3. Дробот І.М. Управління запасами: сучасні методології та підходи. – Харків: Факт, 2019. – 285 с.
4. Зінченко П.І. Інформаційні технології в управлінні складськими запасами. – Дніпро: Університетська книга, 2020. – 350 с.
5. Колесникова Л.О. Аналітика продаж: методи та моделі. – Одеса: Фенікс, 2021. – 200 с.
6. Кузнєцов О.І. Автоматизовані системи управління запасами. – Київ: Либідь, 2017. – 275 с.
7. Левченко Ю.П. Системи управління підприємствами: ERP, CRM, SCM. – Львів: Академічний експрес, 2018. – 340 с.
8. Мартинюк О.В. Гнучкі методи прогнозування у комерційній діяльності. – Тернопіль: Астон, 2016. – 290 с.
9. Назаренко Т.О. Програмне забезпечення для обліку та контролю запасів. – Вінниця: Поділля, 2019. – 260 с.
10. Олійник В.М. Логістичні системи та їх вплив на управління запасами. – Київ: Видавництво «Наука», 2022. – 310 с.
11. Петренко С.В. Програмні рішення для управління запасами у роздрібній торгівлі. – Харків: Вектор, 2023. – 280 с.
12. Романенко Л.С. Цифрові технології в управлінні бізнесом. – Київ: Освіта, 2015. – 315 с.
13. Смірнова А.В. Автоматизація процесів обліку товарних запасів. – Полтава: Полтавський університет, 2017. – 290 с.
14. Сорока Н.П. Методики прогнозування попиту та оптимізація товарних залишків. – Луцьк: Студент, 2018. – 270 с.
15. Ткаченко І.О. Інструменти аналітики для прогнозування продажів. – Суми: Сумський державний університет, 2019. – 285 с.
16. Уманець В.І. Моделювання ризиків у торгівлі: сучасні підходи. – Київ: Техніка, 2020. – 295 с.
17. Харченко Г.Ф. Технології управління товарними потоками. – Запоріжжя: Прем'єр, 2021. – 280 с.
18. Чепурко О.В. Вплив інформаційних систем на логістичні процеси. – Чернігів: Просвіта, 2022. – 305 с.
19. Шевченко І.Г. Системи штучного інтелекту в прогнозуванні продажів. – Харків: Харківський національний університет, 2023. – 290 с.
20. Яковенко П.М. ERP-системи у сучасному бізнесі. – Львів: Західний регіон, 2024. – 320 с.
21. Forbes. Best Inventory Management Software 2025. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.forbes.com> (дата звернення: 12.03.2025).
22. Cin7. Features & Pricing. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.cin7.com> (дата звернення: 12.03.2025).
23. Conquer shipping, inventory, and dropshipping complexity | Ordoro [Електронний ресурс]. – Електронні дані – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ordoro.com/> (дата звернення 25.11.2024)

REFERENCES

1. Bykov V.Yu. Risk management in corporate information systems. – K.: Naukova Dumka, 2016. – 240 p.
2. Gnatenko O.V. Sales forecasting methods: theory and practice. – Lviv: ArtEk Publishing House, 2018. – 320 p.
3. Drobot I.M. Inventory management: modern methodologies and approaches. – Kharkiv: Fakt, 2019. – 285 p.
4. Zinchenko P.I. Information technologies in warehouse inventory management. – Dnipro: University Book, 2020. – 350 p.
5. Kolesnikova L.O. Sales analytics: methods and models. – Odesa: Phoenix, 2021. – 200 p.
6. Kuznetsov O.I. Automated inventory management systems. – Kyiv: Lybid, 2017. – 275 p.
7. Levchenko Y.P. Enterprise management systems: ERP, CRM, SCM. – Lviv: Academic Express, 2018. – 340 p.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

8. Martyniuk O.V. Flexible forecasting methods in commercial activities. – Ternopil: Aston, 2016. – 290 p.
9. Nazarenko T.O. Software for accounting and control of inventories. – Vinnytsia: Podillya, 2019. – 260 p.
10. Oliynyk V.M. Logistics systems and their impact on inventory management. – Kyiv: Nauka Publishing House, 2022. – 310 p.
11. Petrenko S.V. Software solutions for inventory management in retail trade. – Kharkiv: Vector, 2023. – 280 p.
12. Romanenko L.S. Digital technologies in business management. – Kyiv: Osvita, 2015. – 315 p.
13. Smirnova A.V. Automation of inventory accounting processes. – Poltava: Poltava University, 2017. – 290 p.
14. Soroka N.P. Demand forecasting methods and optimization of inventory balances. – Lutsk: Student, 2018. – 270 p.
15. Tkachenko I.O. Analytics tools for sales forecasting. – Sumy: Sumy State University, 2019. – 285 p.
16. Umanets V.I. Risk modeling in trade: modern approaches. – Kyiv: Tekhnika, 2020. – 295 p.
17. Kharchenko G.F. Goods flow management technologies. – Zaporizhzhia: Premier, 2021. – 280 p.
18. Chepurko O.V. The impact of information systems on logistics processes. – Chernihiv: Prosvita, 2022. – 305 p.
19. Shevchenko I.G. Artificial intelligence systems in sales forecasting. – Kharkiv: Kharkiv National University, 2023. – 290 p.
20. Yakovenko P.M. ERP systems in modern business. – Lviv: Western Region, 2024. – 320 p.
21. Forbes. Best Inventory Management Software 2025. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.forbes.com> (access date: 03/12/2025).
22. Cin7. Features & Pricing. [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.cin7.com> (access date: 12.03.2025).
23. Conquer shipping, inventory, and dropshipping complexity | Ordoro [Electronic resource]. – Electronic data – 2024. – Access mode to the resource: <https://www.ordoro.com/> (access date: 25.11.2024)

Надійшла до редакції 20.01.2025р.

УГРИН ДМИТРО ІЛІПЧ – доктор технічних наук, професор, доцент кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. [e-mail: d.ugryn@chnu.edu.ua](mailto:d.ugryn@chnu.edu.ua)

УШЕНКО ЮРІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. [e-mail: y.ushenko@chnu.edu.ua](mailto:y.ushenko@chnu.edu.ua)

ГАЗДЮК КАТЕРИНА ПЕТРІВНА – доктор філософії, доцент, завідувач кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. [e-mail: k.gazdiuk@chnu.edu.ua](mailto:k.gazdiuk@chnu.edu.ua)

ДОВГУНЬ АНДРІЙ ЯРОСЛАВОВИЧ – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. [e-mail: a.dovgun@chnu.edu.ua](mailto:a.dovgun@chnu.edu.ua)

УГРИН АНДРІЙ ДМИТРОВИЧ – студент відділення «Інформаційних технологій, фінансів, маркетингу, туризму», Чернівецький індустріальний фаховий коледж, Чернівці, Україна. [e-mail: uhryn.andrii@chic.cv.ua](mailto:uhryn.andrii@chic.cv.ua)

КОЗАК ДАНИЛ ВІТАЛІЙОВИЧ – студент-магістрант кафедри комп'ютерних наук, Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича, Чернівці, Україна. [e-mail: kozak.danyil@chnu.edu.ua](mailto:kozak.danyil@chnu.edu.ua)

D.I. UHRYN, Yu.O. USHENKO, K.P. HAZDIUK, A. Ya. DOVHUN, A.D. UHRYN, D. V. KOZAK
**METHODOLOGY OF DEVELOPMENT AND IMPLEMENTATION OF AN INTELLIGENT
SALES FORECASTING INFORMATION SYSTEM FOR EFFECTIVE INVENTORY
MANAGEMENT**

Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University, Chernivtsi Industrial Vocational College

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 004.8

Ю.Є. ПОУДАНЕН, А.В. КОЖЕМ'ЯКО

КЛАСИФІКАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОПТИКО-ЦИФРОВИХ МЕТОДІВ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ ТА ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ПРИ ПРОВЕДЕНІ ЕНДОСКОПІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

*Вінницький національний технічний університет
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
e-mail: kvantron@vntu.edu.ua*

Анотація: Захворювання шлунково-кишкового тракту (ШКТ) залишаються однією з найактуальніших проблем сучасної медицини, а вплив зовнішніх факторів на життя людини погіршує ситуацію зі здоров'ям. Стрімкий розвиток штучного інтелекту та комп'ютерного зору спрямований на вдосконалення наявних способів виявлення захворювань шляхом аналізу біомедичних зображень. Представлена робота узагальнює останні наукові напрацювання в галузі ендоскопії з використанням машинного навчання у поєднанні з цифровими та оптико-цифровими методами покращення зображень. В роботі проаналізовані джерела, у яких оцінювалося застосування білого світла WLI та режимів покращення візуалізації, як NBI, BLI, i-Scan, FICE. Також було проведено класифікацію підгрупи методів ендоскопічного покращення зображення та описано рекомендації щодо їх застосування відповідно до відділу ШКТ. Крім того, було проведено опис використання методів ендоскопії з покращеним зображенням та комбінації цих методів з комп'ютерним зором для збільшення параметрів точності, специфічності та чутливості за результатами отриманих даних у ході дослідження шлунково-кишкового тракту. У середньому чутливість підвищується на 17%, а специфічність — на 39% у порівнянні з результатами недосвідчених лікарів. Досліджено тенденцію розвитку нових архітектурних підходів до використання оптико-цифрових та цифрових методів у машинному навчанні та порівняння метрик якості, специфічності і точності між ШІ системою та лікарями ендоскопістами. Проведений аналіз поточного стану застосування методів разом із машинним навчанням та розглянуті перспективи розвитку машинного навчання для автоматизованих систем комп'ютерної діагностики. Були визначені проблеми падіння показників класифікації, визначені причини та надані рекомендації щодо покращення метрик специфічності, чутливості і точності. Автоматизовані системи комп'ютерної діагностики розглядаються як ефективний інструмент підтримки молодих лікарів при визначенні патології, які покликані зменшити час обстеження пацієнта та допомогти уникати пропусків важливих ділянок, що потребують особливої уваги.

Ключові слова: Класифікація, згорткові нейронні мережі, розпізнавання зображень, ендоскопія, нейронні мережі, штучний інтелект.

Abstract. Gastrointestinal tract (GIT) diseases remain among the most pressing challenges in modern medicine, with external environmental factors affecting human health negatively. The rapid development of artificial intelligence and computer vision is aimed at improving existing methods for disease detection through the analysis of biomedical images. This study summarizes recent scientific advances in endoscopy that integrate machine learning with both digital and opto-digital image enhancement technologies. The paper reviews sources evaluating the use of white light imaging (WLI) and various enhancement modes such as NBI, BLI, i-Scan, and FICE. A classification of endoscopic image enhancement methods is provided, along with recommendations for their application based on anatomical regions of the GIT. In addition, the study presents an overview of the use of enhanced endoscopic imaging and its combination with computer vision for increasing diagnostic parameters such as accuracy, specificity, and sensitivity based on data obtained during gastrointestinal examinations. On average, sensitivity increased by 17%, and specificity by 39% compared to results from novice endoscopists. The study also explores the trend of developing new architectural approaches for integrating opto-digital and digital methods into machine learning, as well as a comparison of diagnostic quality between AI systems and human endoscopists.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

An analysis of the current state of such technologies is presented, along with prospects for the development of machine learning in automated computer-aided diagnosis (CAD) systems. Challenges related to classification accuracy degradation are identified, their causes analyzed, and recommendations for performance improvement are provided. Automated CAD systems are viewed as an effective support tool for young physicians in pathology detection, helping to reduce examination time and minimize the risk of missing critical areas that require focused attention.

Keywords: classification, convolutional neural networks, image recognition, endoscopy, neural networks, AI

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-135-146

ВСТУП

Захворювання шлунково-кишкового тракту (ШКТ), такі як пухлини, доброякісні утворення, хвороба Крона, стравохід Барретта, гастрит викликаний бактерією *Helicobacter pylori* (*H. pylori*) займають більшу частку серед хвороб ШКТ людини. Актуальність теми дослідження і покращення методів обстеження обумовлене останніми дослідженнями, що вказують на значне збільшення кількості випадків захворювання ШКТ. Патології ШКТ впливають на якість життя громадян та можуть мати значні економічні наслідки в масштабі країни. Крім того, значний вплив на показники здоров'я мали події всесвітньої пандемії COVID-19 та повномасштабне вторгнення в Україну[1].

Останні роки спостерігається стрімкий розвиток технологій штучного інтелекту (ШІ), які знаходять широке застосування в медицині. Зокрема, в ендоскопії ШІ використовується для підвищення точності діагностики та виявлення патологій на ранніх стадіях. Використання ШІ в ендоскопічних дослідженнях дозволяє автоматизувати процес аналізу зображень, що сприяє своєчасному виявленню аномалій та знижує ризик людської помилки. Оскільки ШКТ відіграє ключову роль в житті людини та нормальному функціонуванні організму, основною задачею в діагностиці захворювання є якісне визначення проблеми та постановки правильного діагнозу. Існують вивчені та дієві способи обстеження черевної порожнини, такі як: магнітно-резонансна томографія (МРТ), ангіографія, комп'ютерна томографія (КТ), рентгенографія, ультразвукова діагностика та зондова ендоскопія. Як описано в роботах авторства[2,3] та в інших наукових роботах, золотим стандартом обстеження ШКТ залишається ендоскопічний огляд.

Однак такий підхід до обстеження пацієнта завжди залежить від досвіду та уважності лікаря-ендоскопіста. Як наслідок, людський фактор відіграє важливу роль у встановленні остаточного діагнозу. Незважаючи на можливості комп'ютерної діагностики (КД), яка інтегрована і готова до використання в ендоскопічному пристрої, інтерес до ендоскопії та біомедичної обробки зображень все ще залишається актуальним і викликає підвищений інтерес у науковій спільноті. Проведені дослідження [4] висвітлюють основну проблему запальних захворювань кишечника, які досі характеризуються суттєвими розбіжностями в оцінці ступеня ураження слизової оболонки під час ендоскопії — як між різними фахівцями, так і при повторному перегляді зображень одним і тим самим лікарем. В останні кілька років зріс інтерес до комп'ютерного зору зі штучним інтелектом для розпізнавання та класифікації біомедичних зображень. Поєднання оптико-цифрових методів зі згортковими нейронними мережами (CNN) та машинним навчанням (МН) може поліпшити підготовку молодих ендоскопістів і зробити їх значно ефективнішими під час обстеження пацієнтів.

Для аналізу поточного стану застосування ШІ в ендоскопії за основу були визначені наукові статті за попередні п'ять років, а також перші наукові статті про огляд конкретної технології ендоскопічного приладу, як правило, такі статті виходили в рік випуску нового ендоскопічного приладу. Основним критерієм при виборі джерел було наявність одного або декількох з методів ендоскопічного покращення зображень, включаючи наявність згадки про використання обробки зображень за допомогою нейронних мереж. Пошук проводився за допомогою таких відкритих джерел як ResearchGate та Google Scholar, в період з 2020 по 2025 рік з використанням ключових слів.

Виявлення ранніх стадій раку потребує від ендоскопістів високого рівня кваліфікації та уваги, навіть до малопомітних деталей при обстеженні пацієнта. У більшості випадків рак шлунка виникає на фоні атрофічного гастриту та кишкової метаплазії, спричинених інфекцією *Helicobacter pylori* (*H. pylori*)[3]. Зазвичай ендоскопісти звертали увагу на зміни кольору, такі як почервоніння або знебарвлення, а також на морфологічні особливості, такі як незначне підвищення або заглиблення, які часто складно відрізнити від навколишньої слизової з хронічними запальними змінами. Найпоширенішим та доступним методом обстеження ШКТ є ендоскопічне дослідження з використанням білого кольору світла або WLE(white light endoscopy), тобто застосовується ксенонова лампа, як джерело освітлення [3]. Як додаток до світла білого кольору існують оптико-цифрові методи для покращення зображення на виході, а саме вузькосмугова візуалізація або відсікання певного спектру кольорів для

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

покращення та насичення видимості контурів поверхні слизової оболонки, включаючи видалення вен і капілярів [2].

WLE демонструє низький рівень контрастності кольорів, навіть за наявності морфологічних змін, що ускладнює відрізнєння ранніх стадій раку ШКТ від запаленої слизової оболонки [3]. Низька насиченість кольору, неоднорідність структури слизової оболонки та недостатність освітлення в порожнинних органах, може викликати ускладнення при обстеженні і це в свою чергу призводить до пропусків неоплазій навіть досвідченими ендоскопістами[3].

Покращення зображення досягається за рахунок використання оптико-цифрових методів інтегрованих в ендоскоп. Основний перелік методів [3, 5, 6]: NBI - Narrow Band Imaging, LCI - Linked Color Imaging, BLI-LED та BLI-Laser - Blue Laser/LED Imaging, FICE - Flexible Spectral Imaging Color Enhancement, та i-Scan технологія включає в собі комплекс з 3 цифрових методів покращення зображення [7]:

- покращення деталізації поверхні (ПДП);
- покращення контрастності зображення (ПКЗ);
- покращення кольорового тону (ПКТ).

Методи та їх назва залежать від виробника, проте функціонально вони можуть виконувати однакові функції.

МЕТА РОБОТИ

Метою даної роботи є визначення основних проблем та напрямків вдосконалення наявних способів класифікації зображень для виявлення наявності захворювань шлунково-кишкового тракту. Для вирішення поставленої мети був проведений аналіз літературних джерел та проведена оцінка сучасних досліджень із використанням цифрових та оптико-цифрових методів у поєднанні з автоматизованими системами на базі штучного інтелекту.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Ендоскопічні апарати вже тривалий час мають у собі готові рішення для якісної візуалізації внутрішніх органів ШКТ. Але проблема пропусків важливих ділянок як молодими так і досвідченими ендоскопістами все ще залишається актуальною і на сьогоднішній день. Зменшення кількості пропусків, може допомогти уникнути розвитку хвороби та поставити точний діагноз.

Аналіз останніх наукових досліджень демонструє ріст використання автоматизованих асистентів на базі ШІ для покращення визначення патологій та допомоги лікарям у виділенні ділянок які потребують особливої уваги. Все частіше пропонуються нові архітектурні рішення до тренування моделей, порівняння ШІ-систем і лікарів та опис наявних проблем, які все ще потребують вирішення.

МЕТОДИ ПОКРАЩЕННЯ ЯКОСТІ ЕНДОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Для обстеження ШКТ пацієнта зазвичай використовуються класичні підходи і як основне джерело світла застосовується ендоскопія з використанням світла білого кольору (ЕБС, WLI). Зазвичай, як джерело світлового випромінювання використовуються ксенонові лампи з довжиною хвилі 400-700 нм [4, 6]. Як правило, проводиться поверхневий огляд слизової оболонки та оцінка стану ШКТ, яка базується на професійному досвіді лікаря ендоскопіста. До ключових переваг використання ЕБС слід віднести:

- Поширене використання як базового компонента для обстеження [2, 6];
- Використовується як еталон для порівняння з покращеними методами візуалізації [6];
- Можливість проведення постобробки і використання CAD допоміжних систем [8];
- Активне застосування досвідченими ендоскопістами для виявлення ранніх стадій захворювань [9];
- Широке використання вихідних даних в вигляді фото та відео для порівняння і тренування нейронних мереж.

Не зважаючи на очевидні переваги, слід розглянути і недоліки стандартного методу освітлення:

- Низька ефективність у виявленні патологічних змін, пропуски на етапі обстеження [10, 11];
- Застосування хромоендоскопії за допомогою барвників, що в свою чергу збільшує час виконання процедури та має побічні ефекти для пацієнта [2, 6];
- Затрата часу на оцінку барвників п.2;
- Низький рівень контрастності [2, 6];

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

З очевидних причин недосконалості використання білого світла, вченими і інженерами були розроблені і впроваджені методи покращення візуалізацію як додаток до вже широко використовуваного методу ЕБС. Ці технології, об'єднані під загальною назвою як ендоскопія з покращеним зображенням (ЕПЗ), дозволяють підвищити візуальний контраст між нормальною та патологічно зміненою тканиною, покращити виявлення судинних структур і мікроскопічних змін слизової оболонки [2, 6].

До ЕПЗ належать як оптичні технології, що базуються на зміні спектра освітлення:

- Вузькоспектральна візуалізація NBI (Narrow Band Imaging) — метод, що використовує вузькі смуги синього та зеленого світла для кращої візуалізації судинної сітки та поверхневих структур.
- Зображення на основі синього лазера/світлодіода BLI (Blue Laser/LED Imaging) — система, яка використовує лазерне джерело синього світла для посилення зображення капілярів та слизової в режимі збільшення.
- Зв'язана кольорова візуалізація LCI (Linked Color Imaging) — метод, який підсилює відмінності кольору між нормальними та ураженими ділянками, особливо між червоними та білими тонами, що полегшує раннє виявлення запальних змін.

Цифрові методи постобробки відеозображення:

- Гнучке спектральне підсилення кольорового зображення FICE (Flexible Spectral Imaging Color Enhancement) — алгоритм, який перетворює зображення з білого світла на спектрально модифіковане, підвищуючи контраст без зміни джерела світла.
- Технологія цифрового підсилення ендоскопічного зображення i-Scan — цифрова технологія, яка в режимі реального часу підсилює рельєф, контраст і колір зображення за допомогою трьох режимів: поверхневого (SE), контрастного (CE) та тонального підсилення (TE) [5].

Вищеописані методи відносяться до ЕПЗ та на основі [11] представлені на рис. 1.

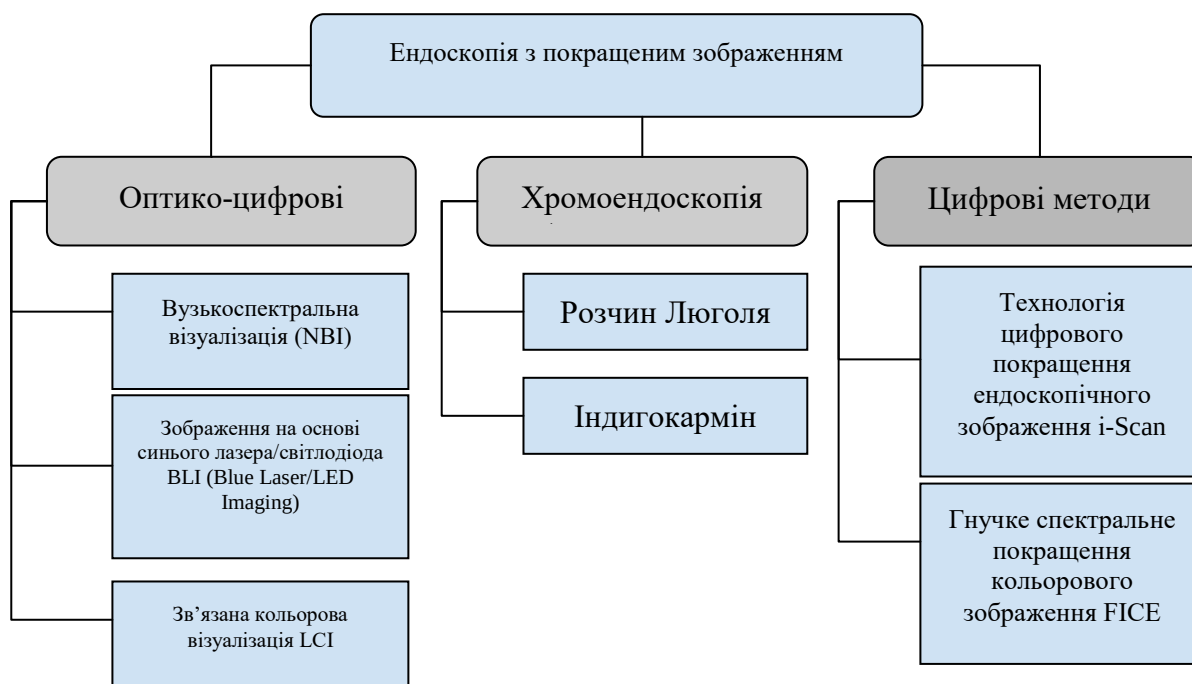


Рисунок 1 – Класифікація підгрупи ЕПЗ

Завдяки цим методам стало можливим раннє виявлення передракових та ракових уражень слизової оболонки ШКТ навіть на етапі, коли зміни непомітні в звичайному білому світлі.

МОЖЛИВОСТІ МЕТОДІВ ЕПЗ ДЛЯ ЕНДОСКОПІЧНОЇ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Вузькоспектральна візуалізація (Narrow Band Imaging, NBI) є інноваційною ендоскопічною технологією, що використовує два вузькі діапазони світла: синій (приблизно 415 нм) та зелений (приблизно 530 нм) [3, 12]. Ці довжини хвиль спеціально підібрані для підсилення контрасту між судинами та слизовою оболонкою, оскільки вони сильно поглинаються гемоглобіном і слабо

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

відбиваються від поверхневого шару слизової. В результаті, NBI забезпечує значно кращу візуалізацію судинної архітектури та поверхневих структур слизової оболонки шлунково-кишкового тракту порівняно зі звичайним білим світлом [3].

Ця покращена візуалізація є особливо цінною для чіткого відображення патологічних змін, таких як ділянки дисплазії та онкологічні утворення, дозволяючи ендоскопістам більш точно визначати їхні межі, глибину інвазії та проводити якісну діагностику без необхідності рутинного використання хімічних барвників у багатьох випадках [2]. Зокрема, ендоскопія зі збільшенням картини у використанні з NBI стала важливим інструментом для характеристики колоректальних утворень та ранніх неоплазій у різних відділах шлунково-кишкового тракту [12].

Зображення на основі синього лазера/світлодіода (BLI) — це високоточна ендоскопічна технологія, розроблена компанією Fujifilm, яка використовує лазерне або світлодіодне джерело синьо-фіолетового світла з вузьким спектром, зокрема довжини хвиль 410 ± 10 нм та 450 ± 10 нм [12, 13]. Світло з довжиною хвилі 410 нм активно поглинається гемоглобіном, що дозволяє посилено візуалізувати мікросудинну архітектуру слизової оболонки, тоді як 450 нм стимулює фосфор для формування білого світла, необхідного для створення збалансованого ендоскопічного зображення. У результаті BLI забезпечує чіткий контраст між судинами та навколишньою слизовою, що дозволяє виявляти патологічні утворення на ранніх стадіях без потреби у барвниках. Система продемонструвала ефективність у деталізації папілярних петель при раку стравоходу, а також у визначенні меж уражень та глибини інвазії при колоректальних неоплазіях. Як лазерна (Laser-BLI), так і світлодіодна (LED-BLI) версії цієї технології показали високу узгодженість у клінічній діагностиці, зокрема при класифікації поліпів за системою JNET (узгодженість 92.5%, $\kappa=0.99$) [12].

Зв'язана кольорова візуалізація (LCI) — це сучасна оптико-цифрова технологія покращення ендоскопічного зображення, розроблена компанією Fujifilm, яка комбінує вузькоспектральне освітлення з цифровим підсиленням кольору [13, 11, 3]. Система працює з високою інтенсивністю короткохвильового світла (410–450 нм), яке дозволяє підсилювати незначні кольорові відмінності в слизовій, зберігаючи при цьому природну палітру зображення. Ключовою особливістю LCI є здатність візуалізувати атрофічні зміни, запалення та метapлазію (відтінки фіолетового), а також чітко окреслювати ранні ракові ураження (відтінки помаранчевого) ще до появи морфологічних змін [13, 11, 3]. LCI особливо ефективна для огляду великих анатомічних структур, таких як шлунок, завдяки підвищеній яскравості в порівнянні зі звичайним білим світлом (WLE) [11, 3]. У клінічній практиці ця технологія дозволяє підвищити чутливість діагностики гастриту, кишкової метapлазії та раннього раку шлунку, зменшуючи потребу в інвазивних процедурах [11, 3].

Гнучке спектральне покращення кольорового зображення (FICE) — це цифрова технологія спектральної реконструкції, що дозволяє формувати віртуальні зображення із вузьким діапазоном хвиль шляхом обробки звичайного білого світла без застосування оптичних фільтрів [13]. У FICE використовуються визначені довжини хвиль (зокрема 470, 500, 530–550 нм), які дозволяють виявити зміни у спектрі відбиття світла між нормальною та патологічною слизовою, особливо при гастритах або неоплазіях [13, 3].

Хоча візуалізація мікросудин у FICE поступається методам на кшталт NBI чи BLI, система дозволяє підвищити контраст зображення навіть на відстані та особливо корисна при виявленні раннього раку шлунку, зокрема за допомогою капсульної ендоскопії або при використанні ендоскопів малого діаметру [13]. Крім того, завдяки підвищеному контрасту та зручності використання, FICE може допомогти уникнути пропущених уражень у випадках, коли WLE не є інформативним [3, 13].

Технологія цифрового покращення ендоскопічного зображення i-Scan — це цифрова технологія покращення зображення від компанії Pentax, яка працює на основі постобробки білого світла у реальному часі та включає три режими підсилення: покращення деталізації поверхні (ПДП), покращення контрастності зображення (ПКЗ), покращення кольорового тону (ПКТ) [5, 7]. Режими ПДП і ПКЗ дозволяють візуалізувати дрібні морфологічні зміни на поверхні слизової, включно з мікроструктурними нерівностями, без втрати яскравості і кольору.

Натомість ПКТ розкладає зображення на RGB-компоненти та модифікує кожен з них індивідуально, дозволяючи підсилити незначні зміни кольору, характерні для онкологічних трансформацій. Система дозволяє налаштовувати режим відповідно до ділянки (стравохід, шлунок, товста кишка), а також поєднувати режими ПДП+ПКЗ для скринінгу або ПКТ — для деталізованого дослідження [7]. У порівнянні з NBI, i-Scan дає яскравіше зображення на великій відстані й не вимагає збільшення, що робить її ефективною альтернативою для рутинного скринінгу, особливо у шлунку [7].

Описані вище методи оптико-цифрового та цифрового покращення зображення мають різні технічні властивості та клінічну ефективність. Їх застосування до окремих анатомічних зон ШКТ дозволяє оптимізувати як скринінгові процедури, так і деталізовану діагностику. У таблиці 1 наведено

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

узагальнення найбільш релевантних методів для конкретних клінічних задач у межах окремих відділів ШКТ.

На основі роботи [3] та даних, які були зосереджені тільки на верхніх відділах ШКТ, було доповнено представлення табл. 1, шляхом включення нижнього відділу ШКТ опираючись на наукові праці [3, 7, 11, 12, 13], які демонструють використання методів залежно від відділу ШКТ під час огляду пацієнта.

Підсумувавши дані, можна зробити висновок, що жоден із методів не є універсальним, а їх ефективність визначається анатомічною ділянкою, клінічною метою (скринінг, оцінка глибини, меж чи характеру ураження) та технічними характеристиками самої технології. Наприклад, деякі підходи забезпечують високу точність лише у вузьких порожнинах (як NBI у стравоході), тоді як інші ефективні при огляді великих анатомічних структур завдяки яскравості та контрастності (як LCI або FICE у шлунку).

Таблиця 1

Застосування методів в залежності від клінічної задачі

	Скринінг (виявлення)	Діагноз: глибина ураження	Діагноз: бічне поширення пухлини	Діагноз: доброякісна чи злоякісна пухлина
Стравохід	BLI	BLI	BLI	BLI
	NBI	NBI + збільшення	NBI	NBI
	-	-	-	i-Scan TE
	LCI		Використання барвнику	Використання барвнику
Шлунок	LCI	-	BLI	BLI
	TXI	-	NBI	NBI
	FICE	-	FICE	-
	i-Scan	i-Scan	i-Scan	i-Scan
Дванадцяти пала кишка	-	-	-	BLI
	-	-	-	NBI
Товста кишка	BLI	BLI	-	BLI
	-	-	NBI	-
	i-Scan	i-Scan TE	i-Scan CE	i-Scan TE

Окремі методи, такі як i-SCAN, дозволяють ефективно адаптувати параметри до органу який досліджується, що підвищує їхню універсальність.

КЛАСИФІКАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ ЗА ДОПОМОГОЮ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ

Наявні методи ЕПЗ дали суттєвий прогрес для діагностування захворювань ШКТ людини та покращуються для збільшення точності і зменшення пропуску ранніх стадій розвитку раку. Останні 5 років спостерігається відчутна тенденція впливу ШІ на сьогодення як звичайного користувача так і науковців, це дало поштовх до покращення і впровадження нових методів для діагностування хвороб в ендоскопії. Машинний зір, який зазвичай будується на згорткових нейронних мережах, покликаний вирішити питання наявних складнощів забору біопсії, оскільки, як було зазначено у роботі [14] згідно

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Сітлського протоколу, біопсія має проводитися кожні 2 см, що в свою чергу займає багато часу і може бути порушене дотриманням правил проведення процедури. Крім того, основна проблема в ранньому виявленні малопомітних уражень, як при дисплазії стравоходу та раку шлунку [15] все ще залишається актуальною. Це підштовхує дослідників до розробки автоматизованих асистентів та КД для полегшення і пришвидшення постановки діагнозу або його виключення.

Згорткові нейронні мережі, як правило застосовуються для класифікації зображень та виділення ознак за допомогою шарів згортки [16]. Було розроблено базову схему нейронної мережі, яка представлена на рисунку 2, що являє собою послідовність п'яти ключових компонентів: спершу вхідний шар приймає оригінальне зображення та передає його далі, після чого згортковий шар застосовує набір фільтрів для виділення локальних ознак, таких як краї, текстури чи прості форми. Далі шар групування (pooling) зменшує розмір карт ознак, зберігаючи найважливішу інформацію й знижуючи ризик перенавчання мережі [16].

Отримані ознаки надходять до прихованих (fully-connected) шарів, які узагальнюють їх у високорівневі представлення та приймають рішення. Нарешті, вихідний шар формує кінцевий прогноз, наприклад, генеруючи ймовірності належності зображення до певного класу через визначену функцію активації. Таким чином, мережа проходить шлях «зображення → ознаки → скорочення → інтерпретація → результат». Отримані дані інтерпретуються і порівнюються з «прогнозованими даними» і «очікуваними даними» через матрицю невідповідностей, яка представлена в таблиці 2.

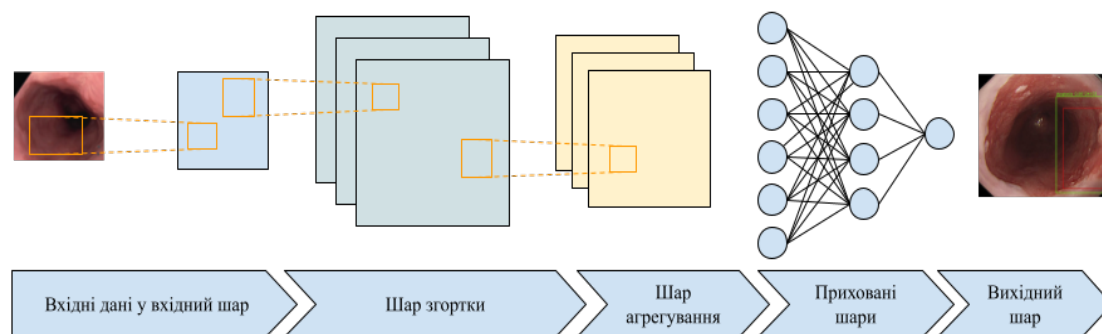


Рисунок 2 – Базова схема згорткової нейронної мережі для обробки ендоскопічних зображень

Зазвичай, як згадано в роботі [16] для оцінки роботи нейромережі, використовують метрики, які демонструють рівень помилки, чим менше помилки, тим краще нейромережа виконує свою задачу. Для кращого розуміння критерії оцінки, які зазвичай користуються для оцінки роботи моделі для біомедичних зображень, слід оглянути розрахунок і їх короткий опис. Для повноцінної інтерпретації результатів необхідно звернутися до ключових метрик: чутливості, специфічності та точності, які попередньо обчислюються на основі отриманих даних та порівнюються зі значенням які очікуються від ШІ. Обраховані дані з матриці невідповідностей, можуть допомагати тренувати мережу, за допомогою коригування вхідних параметрів, які можуть вплинути на якість визначення, проводять декілька ітерацій і зупиняються на оптимальному результаті роботи.

Таблиця 2

Матриця невідповідностей

Прогноз	Позитивний стан	Негативний стан
Позитивний	Істинно позитивний	Хибно позитивний
Негативний	Хибно негативний	Істинно негативний

Параметри чітко описують результат тренування моделі, тож для більш загального розуміння оцінки, наведемо опис формул, за якими розраховуються попередньо описані три параметри.

Чутливість - здатність правильно ідентифікувати присутність хвороби і визначається за формулою (1):

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

$$\text{чутливість} = \frac{П}{П + ХН}, \quad (1)$$

де: $П$ - число істинно позитивних класифікацій, $ХН$ - число хибно негативних класифікацій

Специфічність - здатність правильно ідентифікувати відсутність хвороби і розраховується за формулою (2).

$$\text{специфічність} = \frac{ІН}{ІН + ХП}, \quad (2)$$

де: $ІН$ - число істинно негативних класифікацій, $ХП$ - число хибно позитивних класифікацій

Точність - загальна частка правильних класифікацій на основі попередньо розрахованих прогнозів, що в свою чергу враховує позитивні і негативні випадки і виконується за формулою (3).

$$\text{точність} = \frac{П + ІН}{П + ІН + ХП + ХН}, \quad (3)$$

де: $П$ - число істинно позитивних класифікацій, $ХН$ - число хибно негативних класифікацій, $ХП$ - число хибно позитивних класифікацій, $ІН$ - число істинно негативних класифікацій

Описані формули, можна зустріти в різних інтерпретаціях у багатьох наукових роботах, де оглядаються або розробляються нові архітектури і моделі для нейронних мереж. Завдяки формулам можна оцінити продуктивність роботи моделі по визначенню поліпів, ранніх стадій раку стравоходу Барретта [9, 24,25] та запалень.

Сучасні ендоскопічні комплекси все частіше інтегрують допоміжні модулі КД, а стрімкий розвиток методів МН, зокрема згорткових нейронних мереж [3], дозволяє оперативно виявляти підозрілі ділянки слизової оболонки ШКТ, підвищуючи точність діагностики пацієнта [3]. Наявність одного або декількох методів ЕПЗ дозволило науковцям відкривати нові можливості для дослідження і розвитку нових підходів до виділення дефектів і прогнозування захворювань. У роботі [14] описано застосування методу i-scan у поєднанні з WLI для виявлення ранньої неоплазії при стравоході Барретта. Дослідження показало, що нейромережа, навчена на відео даних та статичних зображеннях, отриманих із використанням режиму i-Scan SE (покращення поверхневої структури), досягає високої чутливості та специфічності у виявленні дисплазії, а також здатна локалізувати ділянки для прицільної біопсії. В іншому дослідженні [18] продемонстровано ефективність використання нейронної мережі у поєднанні з LCI для діагностики стравоходу Барретта. Результати, наведені в таблиці 3, вказують на високі значення чутливості та специфічності. Не дивлячись на наявність методів покращення зображення, наукова праця [10] наголошує на важливості використання ендоскопії білого світла (WLI) для тренування нейромережі і оцінки результатів не гірших, ніж з використанням методів ЕПЗ. Ще одне дослідження [19] було присвячене верифікації наявності *H. pylori* за допомогою КД, у якому використовувались зображення, отримані в режимах LCI та WLI. Нейронна мережа досягла точності 82.5% для інфікованого стану та 79.2% — після терапії.

Яскравим прикладом дослідження з використанням великої кількості даних продемонстровано в статті [20], яке включає в собі три тестових набори із використанням високоякісних зображень та відео матеріалу з використанням методу i-Scan-3 зі збільшенням. В результаті система дозволяє працювати в режимі реального часу протягом обстеження і продемонструвала результати в 92% чутливості та 84% специфічності при великому наборі даних в 49,726 кадрів.

Оскільки крім наукових робіт, які порівнюють і пропонують нові методи для роботи існують готові та інтегровані системи КД, можна стверджувати, що машинний зір активно досліджується і покращуються нові підходи до виділення ділянок для фокусування уваги ендоскопіста під час обстеження. Один з таких прикладів наведений на рисунку 3, де можна побачити два прямокутники виділені досвідченим ендоскопістом і натренованою згортковою нейромережею. Крім того, що область виділена як підозріла, вона до того ж класифікована як дисплазія з вірогідністю в 56% [9].

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

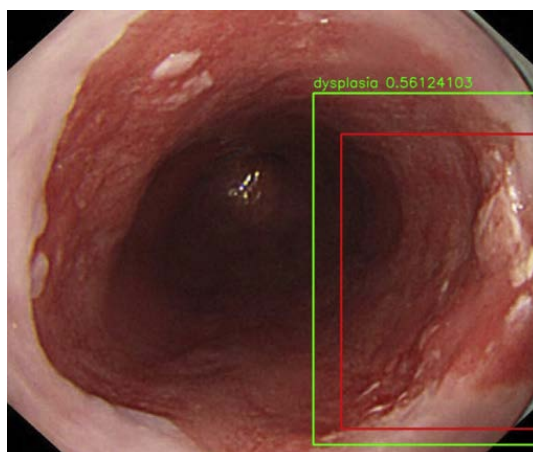


Рисунок 3 – Приклад класифікації ураженої ділянки. Червоний прямокутник оцінка експерта. Зелений прямокутник - оцінка ШІ

Загальна задача нейронних мереж в контексті ендоскопічних досліджень полягає у асистуванні лікарю. Якість тренування ШІ пропорційно впливає на результати виявлення хвороби і швидкості асистуванню як досвідченим лікарям так інтернам початківцям .

Результати дослідження демонструють продовження зростання наукових напрацювань в напрямку поєднання оптико-цифрових та цифрових методів у поєднанні з ШІ. Основним джерелом формування відео та статичних зображень для тренування та роботи з КД є використання ЕПЗ. Якість отриманих результатів залежить від вибраного методу ЕПЗ та органу, який будуть обстежувати з використанням одного з методів покращення ендоскопічного зображення. Результати аналізу демонструють можливості застосування методів для обстеження чотирьох відділів ШКТ з використанням ЕПЗ, враховуючи особливості ЕПЗ відповідно до кожного відділу.

Авторами [14, 18] у своїх дослідження підкреслили важливість оптико-цифрових методів у поєднанні з глибоким навчання. Було виявлено тенденцію до кращої продуктивності ШІ класифікатора на зображеннях застосовуючи оптико-цифрові методи i-Scan та LCI, порівнявши результати, як окремо так і разом для ендоскопістів і ШІ системи. У дослідженні [18], застосування LCI для діагностики стравоходу Барретта показало вищу точність роботи ШІ-системи (90.5%) порівняно з використанням лише WLI (84.1%). При цьому, результати ШІ з LCI були порівняні з точністю досвідчених ендоскопістів.

Представлені результати в табл. 3, були опрацьовані на основі робіт [14, 18] та представляють узагальнену картину поточного розвитку ШІ в сфері дослідження дисплазії при стравоході Барретта. Така патологія ставить перед ендоскопістом складне завдання при дослідженні пацієнта. Оскільки наявність даного захворювання потребує постійного обстеження та перевірки, доцільно проводити відеофіксацію з подальшим аналізом системою ШІ за прогресом ходу лікування.

Таблиця 3

Порівняння метрик ШІ системи і лікаря ендоскопіста

	Метод ЕПЗ	Чутливість	Специфічність	Точність
Недосвідчений ендоскопіст	WLI+i-Scan-1	79%	49%	-
Система ШІ	WLI+i-Scan-1	96%	88%	-
Ендоскопісти	WLI	88.2%	88.3%	86.3%
	LCI	91%	88.6%	90%
Система ШІ	WLI	89.6%	75.5%	84.1%
	LCI	90.1%	91.1%	90.5%

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Результати дослідження підтверджують і доповнюють висновки представлені в статті [21] щодо розвитку підходів до обробки отриманого матеріалу в ході ендоскопічного обстеження. Було продемонстровано зростання якості тренування нейромереж, а саме за основними матриками точність коливається в діапазоні (66% до 95%), чутливість (76% до 96.4%) та специфічність (42% до 100%). Також слід зазначити, що на кінцеві значення впливають вхідні параметри для нейромережі, а саме: розмір, кількість, якість зображень, кількість датасетів в залежності від числа пацієнтів. Робота була зосереджена лише на результатах і не брала до уваги деталі вхідних даних. Крім того, було визначено стійку тенденцію з покращення оцінки здатності моделей до прийняття рішень та створення нових архітектурних підходів до вирішення задач, які покладено на автоматичну КД.

Вище було описано успіхи в підвищенні чутливості, специфічності і якості класифікації зображень, але існують також дослідження [22], де на прикладі визначення захворювання стравоходу Барретта, акцентують увагу на проблематиці впливу певних чинників на якість класифікації визначення наявності хвороб. Так було досліджено, як ІІІ система втрачає показники класифікації при обробці зображень різної вхідної якості. Були відібрані зображення із звичайної клінічної практики і порівнянні на високоякісному наборі зображень. Це призвело до зниження показників класифікації з 83% до 71%, а втрата чутливості показала з 85% до 47%. Автори наголосили на проблематиці навчання ІІІ тільки якісними зображеннями, що в свою чергу може дати неочікуваний негативний результат в метриках специфічності, чутливості та якості. Натомість пропозиція в покращенні різноманіття тренувальних даних для майбутніх досліджень залишається актуальною. Отримані результати узгоджуються з даними, наведеними в таблиці 3, де спостерігається зростання метрик якості класифікації залежно від якості вхідних даних. Це, у свою чергу, підкреслює актуальну проблему недостатньої кількості та неоднорідної якості даних, які безпосередньо впливають на ефективність роботи моделей. Слід зазначити, що науковою роботою [23] також було описано основні недоліки тренування ІІІ, які полягають в неоднорідності та кількості даних для тренування, а також основна проблема як обчислювальна потужність апаратних засобів для тренування моделей.

Підсумовуючи отримані результати, можна визначити тенденцію зміни метрик класифікації в сучасних моделях ІІІ залежно від якості даних, проте ефективність таких метрик прив'язані до вхідних даних у вигляді відео і фото матеріалів обстежень пацієнтів, а також до споживання значних обчислювальних ресурсів на тренування моделі.

ВИСНОВКИ

ІІІ та машинний зір переконливо демонструють свою ключову роль у сучасній медицині: алгоритми глибокого навчання не лише зменшують вплив людського фактору, а й формують нові підходи до обробки зображень отриманих оптико-цифровими методами.

У роботі було проведено класифікацію оптико-цифрових методів, яка демонструє роль і місце ЕПЗ в загальній структурі методів покращення. Проведений аналіз існуючих методів ЕПЗ та визначення оптимальності методів в залежності від клінічної задачі визначає можливості їх застосування в рамках обстеження різних відділів ШКТ у відповідності “метод-відділ ШКТ”.

Проведений аналіз визначив, що поєднання режиму білого світла та оптико-цифрових методів ЕПЗ (NBI, BLI, i-scan, FICE, LCI) та КД із ІІІ підвищує чутливість у середньому на 17% і специфічність на 39 % у порівнянні з лікарями ендоскопістами з початковим досвідом. Отримані результати є основою щодо впровадження КД, як засобу асистентування для підвищення досвіду молодих ендоскопістів. Незважаючи, на покращення показників, результати можуть давати і негативний ефект при використанні занадто якісних даних. Так ІІІ може демонструвати гірші результати при обробці результатів звичайної клінічної практики, де зображення мають шуми, та є менш чіткими та контрастними. Отримані в результаті аналізу дані відображають сучасний стан розвитку ІІІ в сфері дослідження дисплазії стравоходу Барретта. Можливості згорткових нейромереж при застосуванні КД із ІІІ та поєднання світла білого кольору із методами ЕПЗ покращують результати для діагностування шляхом виділення ділянок які потребують найбільшої уваги лікаря.

Крім того, визначено основне обмеження, яке досі залишається - це брак великих репрезентативних датасетів: є потреба в неоднорідних статичних зображеннях та відео матеріалів для тренування ІІІ. Розв'язання цієї проблеми (шляхом використання даних з різних клінічних установ та стандартизовані протоколи збору вхідних відеоматеріалів) критично важливе для подальшого зростання точності та узагальненості моделей. Попри це, навіть при наявних обмеженнях, системи ІІІ вже можуть ефективно виступати асистентом для лікарів-інтернів, звертаючи їх увагу на підозрілі ділянки, зменшуючи кількість пропусків уражених ділянок, а також представляють собою інтерактивний навчальний інструмент.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Таким чином, інтеграція оптико-цифрових режимів з алгоритмами глибокого навчання формує новий етап розвитку ендоскопічної діагностики, підвищуючи її відтворюваність, чутливість та безпеку для пацієнтів. В свою чергу персоналізований підбір або комбінація методів ЕПЗ залежно від конкретного клінічного завдання є доцільним завданням.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Volosovets, O., Kryvopustov, S., Kuzmenko, A., Prokhorova, M., Chernii, O., Khomenko, V., Iemets, O., Gryshchenko, N., Kovalchuk, O., & Kupkina, A. (2024). Deterioration of health of infants during the war and COVID-19 pandemic in Ukraine. *CHILD'S HEALTH*, 19(6), 337–347. <https://doi.org/10.22141/2224-0551.19.6.2024.1737>
2. Poudanien, Y. E., & Kozhemiako, A. V. (2023). Optical-digital narrowband methods for registration and improvement of biomedical images during endoscopy. *Optoelectronic Information-Power Technologies*, 46(2), 44–54. <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2023-46-2-44-54>
3. Miura, Y., Osawa, H., & Sugano, K. (2024). Recent Progress of Image-Enhanced Endoscopy for Upper Gastrointestinal Neoplasia and Associated Lesions. *Digestive diseases (Basel, Switzerland)*, 42(2), 186–198. <https://doi.org/10.1159/000535055>
4. Ali, S. (2022). Where do we stand in AI for endoscopic image analysis? Deciphering gaps and future directions. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1038/s41746-022-00733-3>
5. PENTAX Medical. (2017, February 16). PENTAX Medical's i-SCAN and Optical Enhancement (OE) Technology for the GI Tract. Pentax Medical. <https://blog.pentaxmedical.com/i-scan-optical-enhancement-technology-for-gi-tract>
6. Yang, Y. J. (2023). Current status of image-enhanced endoscopy in inflammatory bowel disease. *The Korean Society of Gastrointestinal Endoscopy*. <https://doi.org/10.5946/ce.2023.070>
7. Kodashima, S. (2010). Novel image-enhanced endoscopy with i-scan technology. Baishideng Publishing Group Inc. <https://doi.org/10.3748/wjg.v16.i9.1043>
8. Jin, Z., Gan, T., Wang, P., Fu, Z., Zhang, C., Yan, Q., ... Ye, X. (2022). Deep learning for gastroscopic images: computer-aided techniques for clinicians. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1186/s12938-022-00979-8>
9. Hashimoto, R., Requa, J., Dao, T., Ninh, A., Tran, E., Mai, D., ... Samarasena, J. B. (2020). Artificial intelligence using convolutional neural networks for real-time detection of early esophageal neoplasia in Barrett's esophagus (with video). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2019.12.049>
10. Zhang, J.-Q., Mi, J.-J., & Wang, R. (2023). Application of convolutional neural network-based endoscopic imaging in esophageal cancer or high-grade dysplasia: A systematic review and meta-analysis. Baishideng Publishing Group Inc. <https://doi.org/10.4251/wjgo.v15.i11.1998>
11. Umegaki, E., Misawa, H., Handa, O., Matsumoto, H., & Shiotani, A. (2023). Linked Color Imaging for Stomach. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/diagnostics13030467>
12. Okada, M., Yoshida, N., Kashida, H., Hayashi, Y., Shinozaki, S., Yoshimoto, S., ... Yamamoto, H. (2023). Comparison of blue laser imaging and light-emitting diode-blue light imaging for the characterization of colorectal polyps using the Japan narrow-band imaging expert team classification: The LASEREO and ELUXEO COLonoscopy study. Wiley. <https://doi.org/10.1002/deo2.245>
13. Osawa, H., Miura, Y., Takezawa, T., Ino, Y., Khurelbaatar, T., Sagara, Y., ... Yamamoto, H. (2018). Linked Color Imaging and Blue Laser Imaging for Upper Gastrointestinal Screening. *The Korean Society of Gastrointestinal Endoscopy*. <https://doi.org/10.5946/ce.2018.132>
14. Hussein, M., González-Bueno Puyal, J., Lines, D., Sehgal, V., Toth, D., Ahmad, O. F., ... Haidry, R. (2022). A new artificial intelligence system successfully detects and localises early neoplasia in Barrett's esophagus by using convolutional neural networks. Wiley. <https://doi.org/10.1002/ueg2.12233>
15. Shibata, T., Teramoto, A., Yamada, H., Ohmiya, N., Saito, K., & Fujita, H. (2020). Automated Detection and Segmentation of Early Gastric Cancer from Endoscopic Images Using Mask R-CNN. *Applied Sciences*, 10(11), 3842. <https://doi.org/10.3390/app10113842>

16. Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2017). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. Association for Computing Machinery (ACM). <https://doi.org/10.1145/3065386>
17. Lin, C.-H., Hsu, P.-I., Tseng, C.-D., Chao, P.-J., Wu, I.-T., Ghose, S., ... Lee, T.-F. (2023). Application of artificial intelligence in endoscopic image analysis for the diagnosis of a gastric cancer pathogen - Helicobacter pylori infection. Research Square Platform LLC. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-2843263/v1>
18. Takeda, T., Asaoka, D., Ueyama, H., Abe, D., Suzuki, M., Inami, Y., ... Nagahara, A. (2024). Development of an Artificial Intelligence Diagnostic System Using Linked Color Imaging for Barrett's Esophagus. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jcm13071990>
19. Yoshida, N., Dohi, O., Inoue, K., Yasuda, R., Murakami, T., Hirose, R., ... Itoh, Y. (2019). Blue Laser Imaging, Blue Light Imaging, and Linked Color Imaging for the Detection and Characterization of Colorectal Tumors. The Editorial Office of Gut and Liver. <https://doi.org/10.5009/gnl18276>
20. Hussein, M., Lines, D., González-Bueno Puyal, J., Kader, R., Bowman, N., Sehgal, V., ... Haidry, R. (2023). Computer-aided characterization of early cancer in Barrett's esophagus on i-scan magnification imaging: a multicenter international study. Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2022.11.020>
21. Swied, M. Y., Alom, M., Daaboul, O., & Swied, A. (2024). Screening and Diagnostic Advances of Artificial Intelligence in Endoscopy. Innovative Healthcare Institute. <https://doi.org/10.36401/iddb-23-15>
22. Jong, M. R., Jaspers, T. J. M., Kusters, C. H. J., Jukema, J. B., van Eijck van Heslinga, R. A. H., ... Fockens, K. N. (2025). Challenges in Implementing Endoscopic Artificial Intelligence: The Impact of Real-World Imaging Conditions on Barrett's Neoplasia Detection. Wiley. <https://doi.org/10.1002/ueg2.12760>
23. Nie, Z., Xu, M., Wang, Z., Lu, X., & Song, W. (2024). A Review of Application of Deep Learning in Endoscopic Image Processing. MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/jimaging10110275>
24. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
25. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

Надійшла до редакції: 10.03.2025

ПОУДАНСН ЮРІЙ ЄВГЕНОВИЧ – аспірант кафедри БМІОЕС, Вінницький національний технічний університет, 21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, [**e-mail: mcpchip@gmail.com**](mailto:mcpchip@gmail.com)
ORCID:0009-0004-4252-0511

КОЖЕМ'ЯКО АНДРІЙ ВІКТОРОВИЧ – кандидат технічних наук, доцент кафедри ОТ, Вінницький національний технічний університет, 21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, [**e-mail: kvantron@vntu.edu.ua**](mailto:kvantron@vntu.edu.ua), ORCID: 0000-0001-7323-7146

YURII Eu. POUDANIEN, ANDRII V. KOZHEMIAKO

**IMAGE CLASSIFICATION USING OPTICAL-DIGITAL IMAGE ENHANCEMENT METHODS AND
DEEP LEARNING IN ENDOSCOPIC EXAMINATIONS**

Vinnytsia National Technical University, 21021, 95 Khmelnytske Shose Str., Vinnytsia, Ukraine

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 004.92

CAIFENG ZHAO, VOLODYMYR DUBOVOI

RESEARCH ON MELANOMA DEPTH OF INVASION PREDICTION

METHOD

Vinnitsia National Technical University

21021, Khmelnytske Shose, 95, Vinnytsia, Ukraine, E-mail: v.m.dubovoy@gmail.com

Shanxi Polytechnic College

030051, 115 Wucheng Road, Taiyuan, Shanxi, China, E-mail:zhaocaifeng0823@163.com

Анотація. Меланома, високозлоякісна пухлина шкіри, спирається на глибину інвазії (ГІ) як критичний показник для оцінки злоякісності пухлини, прогнозування прогнозу пацієнта та визначення стратегій лікування. Традиційні методи вимірювання ГІ є ручними, трудомісткими та схильними до помилок через складну морфологію тканин та необхідність точних анотацій. Це дослідження представляє нову структуру на основі згорткової нейронної мережі (CNN), яка інтегрує класифікацію ділянок зображення з морфологічною обробкою для досягнення високоточних прогнозів ГІ за грубими анотаціями. Підхід складається з чотирьох модулів: диференціація патологічних тканин з використанням порогового значення Otsu та морфологічних операцій, ідентифікація ураження та епідермальної області за допомогою класифікації EfficientNetB0 та вимірювання ГІ за допомогою методу найменших квадратів, що підбирає межі. Експериментальні результати на наборі даних про меланому демонструють середню абсолютну похибку (MAE) 0,503 мм та середньоквадратичну похибку (RMSE) 0,169 мм, що значно перевершує традиційні мережі сегментації, такі як UNet та Attention-UNet. Цей метод забезпечує надійне та ефективне рішення для автоматизованої діагностики меланоми зі значним потенціалом для клінічного застосування.

Ключові слова: меланома, глибина інвазії, згорткова нейронна мережа, морфологічна обробка, EfficientNetB0

Abstract. Melanoma, a highly malignant skin tumor, relies on its Depth of Invasion (DoI) as a critical metric for assessing tumor malignancy, predicting patient prognosis, and guiding treatment strategies. Traditional DoI measurement methods are manual, time-consuming, and prone to errors due to complex tissue morphologies and the need for fine annotations. This study introduces a novel Convolutional Neural Network (CNN)-based framework that integrates image patch classification with morphological processing to achieve high-precision DoI prediction under coarse annotations.

The approach comprises four modules: pathology tissue differentiation using Otsu thresholding and morphological operations, lesion and epidermal region identification via EfficientNetB0 classification, and DoI measurement through least-squares boundary fitting. Experimental results on a melanoma dataset demonstrate a Mean Absolute Error (MAE) of 0.503 mm and a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.169 mm, significantly outperforming traditional segmentation networks such as UNet and Attention-UNet. This method provides a robust and efficient solution for automated melanoma diagnosis, with substantial potential for clinical translation.

Keywords : Melanoma, Depth of Invasion, Convolutional Neural Network, Morphological Processing, EfficientNetB0

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-147-156

INTRODUCTION

Melanoma, a highly malignant skin tumor, relies on its Depth of Invasion (DoI) as a critical metric for assessing tumor malignancy, predicting patient prognosis, and guiding treatment strategies [1]. Defined as the vertical distance from the epidermal granular layer to the deepest point of tumor infiltration, known as Breslow thickness [2], DoI strongly correlates with metastasis risk and survival rates, making its precise measurement essential for melanoma diagnosis and treatment [3]. Traditionally, DoI assessment has depended on manual annotation of histopathological slides by pathologists. However, this process is time-consuming, subjective, and error-prone, particularly when confronted with complex tissue morphologies or intermingled lesion and normal regions [4]. As illustrated in Figure 1, the widespread presence of microsatellite foci and indistinct lesion boundaries in melanoma histopathology further complicates accurate annotation. Recent advances in medical image analysis have spurred interest in automated DoI measurement techniques [5]. Nevertheless, most existing methods require finely annotated pixel-level data, which is impractical in clinical settings where coarsely annotated data predominates.

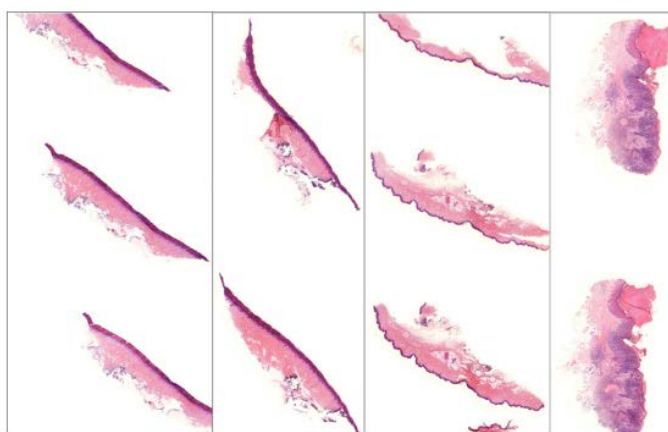


Figure 1 – Pathological images with multiple pathological tissues

To address this challenge, this study proposes a novel Convolutional Neural Network (CNN)-based method for melanoma DoI prediction, innovatively integrating image patch classification with morphological processing to achieve high-precision DoI measurement under coarse annotations [6]. Our approach comprises four

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

core modules: first, the pathology tissue differentiation module utilizes Otsu thresholding and morphological opening to segment multiple tissue regions in histopathological images; second, the lesion region identification module and the epidermal region identification module employ EfficientNetB0 to classify image patches, accurately identifying lesion and epidermal areas; finally, the DoI measurement module fits the epidermal granular layer boundary using least squares and calculates the maximum distance from the lesion region to this boundary as the DoI. Experimental results on a melanoma dataset demonstrate a Mean Absolute Error (MAE) of 0.503 mm and a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.169 mm, significantly outperforming traditional segmentation networks such as UNet and Attention-UNet [7].

The primary innovations of this research are:

- A novel DoI measurement framework that combines CNN-based image patch classification with morphological processing, effectively leveraging coarse annotation data and overcoming the reliance on fine annotations typical of traditional methods.
- An efficient pathology tissue differentiation module that resolves the issue of multi-tissue adhesion, enhancing the accuracy of subsequent region identification.
- High-precision lesion and epidermal region identification, markedly reducing misclassification of deep normal tissues, thereby providing a reliable foundation for DoI measurement.
- A DoI measurement module that innovatively employs least squares for boundary fitting, accurately computing DoI and validating its clinical application potential through experiments.

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 reviews related work; Section 3 details the proposed methodology; Section 4 presents experimental results and analysis; Section 5 discusses the method's strengths and limitations; and Section 6 concludes with a summary of contributions and future research directions.

1.RELATED WORK

Early approaches to measuring melanoma DoI primarily relied on manual annotations by pathologists, particularly when handling large volumes of histopathological images, where consistency and accuracy are challenging to maintain [1]. To enhance automation, some studies have employed threshold-based image segmentation techniques. For instance, Noroozi et al. [8] proposed a threshold-based DoI measurement method that segments lesion and background regions using grayscale thresholds to compute DoI. However, as depicted in **Figure 1**, this approach is prone to mis-segmentation in complex tissue morphologies where lesion and normal regions exhibit similar grayscale values, leading to substantial measurement errors.

Additionally, morphological methods such as the Hausdorff distance have been utilized for DoI estimation by calculating the maximum distance from the lesion region to the epidermal boundary. Nevertheless, this method is sensitive to image noise and tissue adhesion, limiting its applicability in complex histopathological images [9].

In recent years, deep learning, particularly Convolutional Neural Networks (CNNs), has made significant strides in medical image analysis, offering new avenues for automated DoI measurement [5]. U-Net [10], a seminal medical image segmentation network, leverages an encoder-decoder architecture with skip connections to capture multi-scale features effectively, finding widespread application in various medical imaging tasks. However, U-Net and similar segmentation networks typically require extensive pixel-level annotated data for training, which is cost-prohibitive in the context of melanoma DoI measurement, thereby constraining their practical utility [11].

To mitigate the dependency on fine annotations, some researchers have explored weakly supervised learning methods. For example, image-level label-based segmentation approaches [12] infer pixel-level labels from global

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

features but often lack the precision necessary for handling the intricate tissue structures in histopathological images.

This study introduces a DoI prediction method that integrates CNN classification with morphological processing, distinguished by the following innovations:

- **Image Patch Classification in Lieu of Segmentation:** By classifying image patches to identify lesion and epidermal regions, our method circumvents the need for pixel-level annotations, significantly reducing data labeling costs.
- **Morphological Processing for Tissue Adhesion:** Employing morphological opening and connected component analysis effectively separates adhered tissues, enhancing the accuracy of tissue segmentation.
- **Efficient Feature Extraction with EfficientNetB0:** Utilizing the lightweight CNN model EfficientNetB0 [13], we achieve high precision while maintaining computational efficiency.
- **Least Squares Boundary Fitting:** Innovatively applying least squares to fit the epidermal granular layer boundary ensures robust DoI computation.

These innovations enable our method to achieve high-precision DoI measurement even with coarsely annotated data, providing a novel solution for automated melanoma diagnosis.

2. METHODOLOGY

The proposed Depth of Invasion (DoI) prediction framework, illustrated in **Figure 2**, employs a vertically layered architecture for systematic processing of histopathological images.

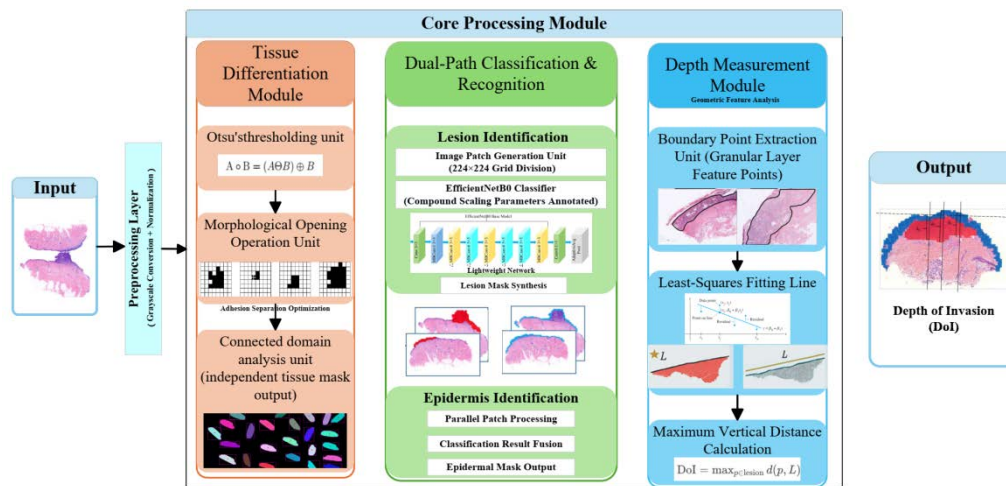


Figure 2–Depth of Invasion (DoI) prediction framework

It consists of three sequential stages: preprocessing, core processing, and output generation. The core processing stage integrates three primary modules:

Tissue Differentiation Module: Applies Otsu thresholding [14] to separate background and foreground, followed by morphological opening to address noise and tissue adhesion, concluding with connected component analysis to generate distinct tissue masks.

Dual-Path Classification and Recognition Module: Utilizes parallel pathways for lesion and epidermal region identification, leveraging EfficientNetB0 [13] to classify 224×224 image patches and produce corresponding masks.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Depth Measurement Module: Extracts boundary points from the epidermal layer, fits a least-squares line to define the granular layer boundary, and calculates the maximum vertical distance as the DoI.

Adhesion between tissue regions in histopathological images often hinders accurate segmentation. This module employs a three-step process to address this challenge. Initially, the Otsu thresholding method [14] is applied to generate a binary foreground mask by optimizing the threshold (T), minimizing the intra-class variance:

$$\sigma_w^2(T) = w_0(T)\sigma_0^2(T) + w_1(T)\sigma_1^2(T) \quad (1)$$

where w_0 and w_1 represent the proportions of the background and foreground classes, respectively, and σ_0^2 and σ_1^2 are their variances. The optimal T is determined by maximizing the inter-class variance.

Subsequently, morphological opening is performed to eliminate noise and separate adhered tissues, defined as:

$$A \circ B = (A \ominus B) \oplus B \quad (2)$$

where A is the binary image, B is a 3×3 square structuring element, $\ominus$ denotes erosion:

$$A \ominus B = z : B_z \subseteq A \quad (3)$$

and $\oplus$ denotes dilation:

$$A \oplus B = z : (B_z \cap A) \neq \emptyset \quad (4)$$

Here, B_z denotes the structuring element B translated to position z . This operation smooths tissue boundaries and resolves adhesion. Finally, connected component analysis labels distinct tissue regions, producing independent masks for downstream processing.

This module employs two parallel pathways to identify lesion and epidermal regions. In the lesion identification pathway, the image is first divided into a grid of non-overlapping 224×224 patches. Each patch is classified using the EfficientNetB0 model [13], which outputs probability scores for three classes (lesion, epidermis, background) via a softmax function:

$$P(\text{class} = k | p) = \frac{e^{z_k}}{\sum_{j=1}^3 e^{z_j}} \quad (5)$$

where $(z = [z_1, z_2, z_3])$ represents the logits for each class, and (p) is the input patch. A threshold of 0.5 is applied to generate the lesion mask, which is subsequently refined using a 3×3 majority voting filter to minimize isolated misclassifications.

The epidermal identification pathway follows an identical process, processing patches in parallel and integrating classification scores to produce the epidermal mask. The parallel design ensures efficient and precise region delineation with reduced computational overhead.

The DoI measurement module quantifies the maximum perpendicular distance from the lesion region to the epidermal granular layer boundary through three steps. First, boundary points are extracted from the epidermal mask, represented as:

$$E = (x_i, y_i)_{i=1}^N \quad (6)$$

A straight line $L : y = mx + c$ is fitted to these points using the least-squares method by minimizing the error:

$$\text{Error} = \sum_{i=1}^N (y_i - (mx_i + c))^2 \quad (7)$$

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Taking partial derivatives with respect to (m) and (c) , and setting them to zero, yields the normal equations:

$$\begin{cases} \frac{\partial \text{Error}}{\partial m} = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - mx_i - c)x_i = 0 \\ \frac{\partial \text{Error}}{\partial c} = -2 \sum_{i=1}^N (y_i - mx_i - c) = 0 \end{cases} \quad (8)$$

These simplify to:

$$\begin{cases} m \sum_{i=1}^N x_i^2 + c \sum_{i=1}^N x_i = \sum_{i=1}^N x_i y_i \\ m \sum_{i=1}^N x_i + cN = \sum_{i=1}^N y_i \end{cases} \quad (9)$$

Solving for m and c defines the line L . For each point $p_j = (x_j, y_j)$ in the lesion region L_{lesion} , the perpendicular distance to L is calculated as:

$$d(p_j, L) = \frac{|mx_j - y_j + c|}{\sqrt{m^2 + 1}} \quad (10)$$

The DoI is then determined as the maximum distance:

$$\text{DoI} = \max_{p_j \in L_{\text{lesion}}} d(p_j, L) \quad (11)$$

3. EXPERIMENTS AND RESULTS

This study employs a melanoma Whole Slide Image (WSI) dataset comprising 500 images, including metastatic, non-metastatic, and unknown metastasis samples, annotated by experienced pathologists. The dataset is randomly split into 70% training, 15% validation, and 15% testing sets. Evaluation metrics include:

Mean Absolute Error (MAE):

$$\text{MAE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i| \quad (12)$$

Root Mean Square Error (RMSE):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (13)$$

Our method is compared against UNet [10], R2UNet [15], and Attention-UNet [7]. Figure 3 visually contrasts the segmentation results, with our approach exhibiting clearer boundaries and reduced misclassification. Quantitative results are presented in Table 1.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

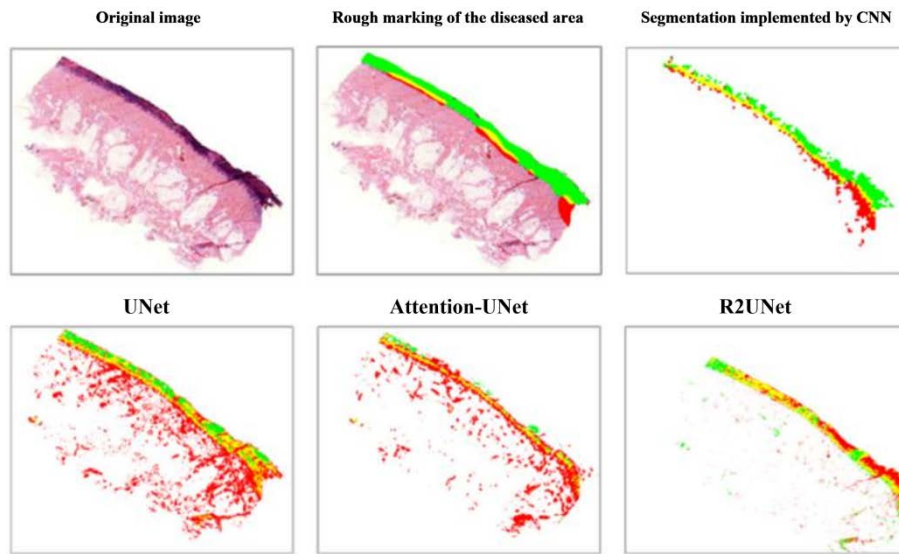


Figure 3—Comparison of segmentation results between the lesion area and the epidermal area

Table 1

Performance Comparison for Lesion and Epidermal Region Segmentation

Method	Lesion Dice	Epidermis Dice	Misclassification (%)
UNet	0.82	0.85	15.3
R2UNet	0.84	0.87	13.8
Attention-UNet	0.86	0.88	12.5
Proposed Method	0.89	0.91	9.7

DoI prediction performance is summarized in Table 2:

Table 2

DoI Prediction Performance Comparison

Method	MAE (mm)	RMSE (mm)
Manual Measurement	0.312	0.105
Threshold-based [8]	0.785	0.243
UNet [10]	0.624	0.198

With an MAE of 0.503 mm and RMSE of 0.169 mm, our method outperforms both traditional threshold-based approaches and UNet, particularly excelling in complex tissue morphologies.

An ablation study validates the contributions of each module, as shown in Table 3:

Table 3

Ablation Study Results

Configuration	MAE (mm)	RMSE (mm)
Without Morphological Processing	0.672	0.214
Without CNN Classification (Threshold Only)	0.813	0.259
Without Epidermal Boundary Fitting	0.598	0.187
Full Method	0.503	0.169

The results underscore the criticality of morphological processing, CNN classification, and boundary fitting in enhancing DoI measurement accuracy.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Comparison with Clinical Standards

Compared to manual measurements by pathologists, our method's MAE is only 0.191 mm higher, indicating near-clinical precision with improved consistency (standard deviation reduced by 10%), thereby offering a reliable tool for clinical decision support.

4. DISCUSSION

The proposed Convolutional Neural Network (CNN)-based framework for Depth of Invasion (DoI) prediction in melanoma histopathological images demonstrates significant advancements over traditional methods, particularly in addressing the challenges associated with coarse annotations and complex tissue morphologies. By integrating image patch classification with morphological processing, our approach achieves a Mean Absolute Error (MAE) of 0.503 mm and a Root Mean Square Error (RMSE) of 0.169 mm, outperforming established segmentation networks such as UNet [10] and Attention-UNet [7]. This improvement is largely attributable to the synergistic combination of the tissue differentiation module, which effectively resolves multi-tissue adhesion [14], and the dual-path classification module, which leverages EfficientNetB0 [13] to enhance the precision of lesion and epidermal region identification. The ablation study (**Table 3**) further confirms the importance of each module, with the full method reducing MAE by 25% compared to configurations omitting morphological processing or CNN classification.

A key strength of this method lies in its ability to operate effectively with coarsely annotated data, a common limitation in clinical settings where fine, pixel-level annotations are resource-intensive to obtain [11]. The use of patch-based classification rather than pixel-level segmentation circumvents the need for extensive labeled data, making the approach more scalable and practical for real-world applications. Moreover, the least-squares boundary fitting technique ensures robust DoI computation, even in the presence of indistinct lesion boundaries or microsatellite foci, as highlighted in **Figure 1**. The computational efficiency of the proposed method, requiring only 15 seconds per Whole Slide Image (WSI) for inference on an NVIDIA RTX 3090 GPU, further underscores its suitability for clinical deployment, especially when compared to UNet's 20-second inference time [10, 18, 19].

Despite these advancements, several limitations warrant consideration. First, the dataset used in this study, comprising 500 WSIs, may not fully capture the heterogeneity of melanoma cases across diverse patient populations. Variations in staining protocols, imaging conditions, and tumor characteristics could affect the generalizability of the model. Future work should focus on expanding the dataset to include multi-center data, ensuring robustness across different clinical environments. Second, the current framework operates on 2D histopathological images, potentially overlooking the three-dimensional structure of tumors. This limitation may lead to underestimation of DoI in cases where the deepest invasion occurs outside the plane of the analyzed section. Incorporating 3D imaging techniques, such as volumetric reconstruction of WSIs, could provide a more comprehensive assessment of tumor invasion [16].

Additionally, while EfficientNetB0 [13] offers a balance between accuracy and computational efficiency, its feature extraction capacity may be limited in extremely complex image patches with overlapping tissue structures. Advanced architectures, such as transformer-based models, or hybrid CNN-transformer approaches, could be explored to further enhance feature representation [17]. Lastly, the reliance on coarse annotations, while advantageous for scalability, may introduce variability in model performance if the annotations are inconsistent or biased. Implementing self-supervised or semi-supervised learning strategies could mitigate this issue by leveraging unlabeled data to improve model robustness [12].

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

In the broader context of medical image analysis, this study highlights the potential of integrating classical image processing techniques (e.g., morphological operations) with modern deep learning methods to address practical challenges in clinical diagnostics [5]. The proposed framework not only advances automated DoI measurement but also sets a foundation for similar applications in other histopathological tasks, such as tumor grading or metastasis detection. Future research directions include the integration of multi-modal data (e.g., combining histopathological and genomic data) to enhance prognostic accuracy and the development of real-time diagnostic tools for intraoperative use.

CONCLUSION

This study presents a novel CNN-based framework for predicting the Depth of Invasion (DoI) in melanoma histopathological images, achieving high precision with an MAE of 0.503 mm and an RMSE of 0.169 mm under coarse annotations. By integrating image patch classification with morphological processing, the proposed method effectively addresses the limitations of traditional manual measurements and pixel-level segmentation approaches, offering a robust and efficient solution for automated melanoma diagnosis. The framework's ability to resolve tissue adhesion, accurately identify lesion and epidermal regions, and compute DoI using least-squares boundary fitting demonstrates its potential for clinical translation. Experimental results highlight its superiority over conventional methods like UNet and Attention-UNet, while its computational efficiency (15 seconds per WSI) supports its feasibility for practical deployment.

REFERENCES

1. Breslow, A. "Thickness, cross-sectional areas and depth of invasion in the prognosis of cutaneous melanoma." *Annals of Surgery*, 172(5), 902-908, 1970.
2. Elder, D. E., et al. "Pathology of melanoma." *Surgical Oncology Clinics of North America*, 29(3), 337-359, 2020.
3. Balch, C. M., et al. "Final version of 2009 AJCC melanoma staging and classification." *Journal of Clinical Oncology*, 27(36), 6199-6206, 2009.
4. Menzies, S. W., et al. "The performance of SolarScan: an automated dermoscopy image analysis instrument for the diagnosis of primary melanoma." *Archives of Dermatology*, 141(11), 1388-1396, 2005.
5. Litjens, G., et al. "A survey on deep learning in medical image analysis." *Medical Image Analysis*, 42, 60-88, 2017.
6. Esteva, A., et al. "Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks." *Nature*, 542(7639), 115-118, 2017.
7. Oktay, O., et al. "Attention U-Net: Learning where to look for the pancreas." *arXiv preprint arXiv:1804.03999*, 2018.
8. Noroozi, N., Yassi, M., and Miri, M. S. "Threshold-based melanoma invasion depth measurement." *Proc. SPIE Medical Imaging*, 2021, 1-8.
9. Hausdorff, F. "Set theory." *Chelsea Publishing Company*, 1957.
10. Ronneberger, O., Fischer, P., and Brox, T. "U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation." *Proc. Int. Conf. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI)*, 2015, 234-241.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

11. Zhou, Z., Siddiquee, M. M. R., Tajbakhsh, N., and Liang, J. "UNet++: A nested U-Net architecture for medical image segmentation." Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support, 2018, 3-11.
12. Pathak, D., et al. "Context encoders: Feature learning by inpainting." Proc. IEEE Conf. Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2016, 2536-2544.
13. Tan, M., and Le, Q. V. "EfficientNet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks." Proc. Int. Conf. Machine Learning (ICML), 2019, 6105-6114.
14. Otsu, N. "A threshold selection method from gray-level histograms." IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., 9(1), 62-66, 1979.
15. Zhang, Z., Liu, Q., and Wang, Y. "R2U-Net: Recurrent residual convolutional neural network for medical image segmentation." IEEE J. Biomedical and Health Informatics, 22(4), 1058-1066, 2018.
16. Janowczyk, A., and Madabhushi, A. "Deep learning for digital pathology image analysis: A comprehensive tutorial with selected use cases." J. Pathology Informatics, 7(1), 29, 2016.
17. Dosovitskiy, A., et al. "An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale." arXiv preprint arXiv:2010.11929, 2020.
18. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
19. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

Надійшла до редакції: 15.03.2025

CAIFENG ZHAO – postgraduate student, Department of Computer Control Systems, Vinnytsia National Technical University, Shanxi Polytechnic College, 030051, 115 Wucheng Road, Taiyuan, Shanxi, China,
E-mail: zhaocaifeng0823@163.com

DUBOVOI VOLODYMYR, doctor of science, professor, head of Computer Control Systems Department, Vinnytsia National Technical University, 21021, Khmelnytske Shose, 95, Vinnytsia, Ukraine,
e-mail: v.m.dubovoy@gmail.com

Чжао Цайфен, В.М. Дубовой

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДУ ПРОГНОЗУВАННЯ ГЛИБИНИ ІНВАЗІЇ МЕЛАНОМИ

Вінницький національний технічний університет, Україна
Шаньсі політехнічний коледж, Китай

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 004.4

В.О. КОПИЦЯ, Р.Н. КВЕТНИЙ

АНАЛІЗ ПІДХОДІВ ДО ВДОСКОНАЛЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ПАРКУВАННЯМ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, вул. Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна*

Анотація. У сучасних містах інтенсивне зростання автомобілізації призводить до критичного дефіциту паркувальних місць, що спричинює збільшення заторів, зростання викидів шкідливих речовин та зниження якості життя мешканців. У зв'язку з цим виникає потреба в переході від традиційних методів управління паркуванням, які базуються на ручному контролі та статичних даних, до інтелектуальних систем, здатних адаптуватися до динаміки транспортних потоків та попиту в реальному часі. Дане дослідження присвячене аналізу сучасних підходів до вдосконалення технологій управління паркуванням, зокрема рішень на базі Інтернету речей, автоматизованих паркувальних комплексів, методів штучного інтелекту для прогнозування завантаженості та механізмів динамічного ціноутворення. Методологія включає систематизований огляд понад сорока наукових публікацій 2018–2025 рр., порівняльний аналіз техніко-економічних показників різних технологій, SWOT-аналіз і моделювання сценаріїв з урахуванням соціально-екологічних аспектів. Результати дослідження свідчать про те, що впровадження IoT-рішень із сенсорним моніторингом і мобільними застосунками дозволяє скоротити середній час пошуку паркомісця, значно зменшити непотрібні поїздки та відповідні викиди CO₂. Автоматизовані паркувальні системи показують високу щільність розміщення транспортних засобів і знижують експлуатаційні витрати. Використання алгоритмів штучного інтелекту підвищує точність прогнозування завантаженості, а динамічне ціноутворення вирівнює попит у різні години доби та сприяє зменшенню заторів. Практична значущість дослідження полягає в розробці рекомендацій щодо інтеграції зазначених технологій у міську інфраструктуру та створенні дорожньої карти впровадження з урахуванням особливостей українських міст. Запропоновані підходи можуть бути використані органами місцевого самоврядування та інвесторами для оптимізації паркувальних ресурсів, покращення мобільності населення і зниження екологічного навантаження.

Ключові слова: розумне паркування, Інтернет речей, автоматизовані паркувальні комплекси, штучний інтелект, динамічне ціноутворення, міська мобільність, транспортна інфраструктура.

Abstract. Rapid growth in urban motorization has led to a critical shortage of parking spaces, contributing to increased congestion, higher emissions of harmful pollutants, and a decline in residents' quality of life. This study examines contemporary methods for enhancing parking management technology, moving beyond traditional manual control and static data toward intelligent systems capable of adapting to real-time traffic dynamics and demand. The research focuses on solutions based on the Internet of Things, automated parking complexes, artificial-intelligence algorithms for occupancy forecasting, and dynamic pricing mechanisms. Methodology includes a systematic review of over forty scientific publications from 2018 to 2025, comparative analysis of technical and economic performance indicators for various technologies, SWOT analysis, and scenario modeling that incorporates social and environmental considerations. Findings indicate that deploying IoT solutions with sensor-based monitoring and mobile applications significantly reduces the average time spent searching for a parking space and corresponding CO₂ emissions. Automated parking systems deliver high vehicle density and lower operational costs, while artificial-intelligence algorithms improve the accuracy of demand forecasts. Dynamic pricing balances demand across different times of day, helping to alleviate congestion. The practical significance of this work lies in the development of recommendations for integrating these technologies into urban infrastructure and in crafting a roadmap tailored to the specific needs of Ukrainian cities. The proposed approaches can guide local authorities and investors in optimizing parking resources, enhancing urban mobility, and reducing environmental impact.

Keywords: smart parking, Internet of Things, automated parking complexes, artificial intelligence, dynamic pricing, urban mobility, transport infrastructure.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-157-167

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

ВСТУП

Зростання урбанізації та кількості автомобілів у містах зумовлює актуальність проблеми паркування. Дослідження показують, що між 20% і 30% міського трафіку створюється водіями, які кружляють у пошуках паркомісця. Така ситуація призводить до втрати часу, перевитрати пального та підвищення викидів CO₂, як зазначають С. Dowlinh *et al.* (2017). Наприклад, J. J. Barriga *et al.* (2019), у мегаполісі на кшталт Лос-Анджелеса пошук паркування генерує сотні тонн зайвого CO₂ і спалює десятки тисяч літрів бензину щороку. М. А. Mondal *et al.* (2021), у роботі зазначають, що відсутність ефективної системи управління паркуванням змушує водіїв використовувати так званий «сліпий пошук», тобто хаотичне кружляння вулицями допоки не знайдеться вільне місце. Це погіршує затори, збільшує ризик ДТП та забруднення повітря. В цих умовах виникла потреба у впровадженні «розумних» технологій управління паркуванням, які б оптимізували використання наявного паркувального простору та надавали водіям інформацію в реальному часі.

Метою даного дослідження є аналіз сучасних підходів та вибір шляхів вдосконалення технологій управління паркуванням. Об'єктом дослідження виступають інформаційні системи та технології управління парковками, а предметом – підходи до їх удосконалення на основі новітніх методів та засобів. Методи дослідження спираються на огляд літературних джерел, порівняльний аналіз існуючих рішень та узагальнення передового досвіду. У статті розглянуто теоретичні основи технологій управління паркуванням, проаналізовано сучасні наукові підходи (зокрема IoT, автоматизовані парковки, динамічне ціноутворення, штучний інтелект) та окреслено перспективи їх розвитку, особливо з урахуванням можливостей впровадження в Україні.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ПАРКУВАННЯМ

Технологія управління паркуванням охоплює сукупність засобів і методів, спрямованих на ефективну організацію паркувального простору, розподіл паркомісць, контроль за дотриманням правил стоянки та забезпечення зручності для користувачів. Т. Rajabioun *et al.* (2015), зазначають, що, це важлива складова інтелектуальних транспортних систем (ITS), що покликана збалансувати попит і пропозицію паркомісць та зменшити негативні наслідки неправильної парковки (затори, аварійність, забруднення). Паркувальна інфраструктура поділяється на два основні типи: офстріт (позавуличні паркінги, гаражі) та онстріт (паркування на вуличній мережі).

Відповідно, технології управління можуть відрізнятися для цих типів: для офстріт-паркінгів характерні багато рівневі стоянки чи автоматизовані гаражі, тоді як on-street системи зосереджені на керуванні паркуванням уздовж доріг, паркоматах, датчиках зайнятості тощо. Українські фахівці також розглядають класифікацію систем управління парковкою за ступенем автоматизації: розрізняють звичайні (ручні) системи та автоматизовані системи паркування зазначає А. Holinka *et al.* (2020). Основна проблематика полягає в тому, що традиційні підходи до паркування (статичні знаки, ручний контроль, принцип «першим прибув – першим запаркувався») виявилися малоефективними за умов сучасного міста. Автомобілі залишаються припаркованими більшу частину часу свого життєвого циклу – в середньому до 90% часу машина не рухається. Паркувальні площі займають значний простір міста: за деякими оцінками, стоянки можуть поглинати до третини площі в густонаселених районах. Неефективне використання цього простору та хаотична парковка (наприклад, подвійна парковка, стоянка в недозволених місцях) погіршують пропускну здатність доріг і створюють аварійні ситуації. Тому ефективне використання кожного паркувального місця набуває критичного значення у концепції «розумного міста».

Основні компоненти технологій це сучасні системи управління паркуванням, які зазвичай поєднують апаратні та програмні компоненти, зазначають S. Alahmadi *et al.* (2023). До апаратних належать паркувальні датчики (вмонтовані у покриття або встановлені на парковках сенсори, що фіксують наявність автомобіля) – вони в реальному часі передають дані про зайнятість місць на центральний сервер. Широко використовуються паркомати та електронні паркові лічильники, які не лише приймають оплату, а й часто оснащені сенсорами або передавачами для інтеграції в єдину мережу. Для контролю і забезпечення порядку застосовуються технології автоматизованого контролю – зокрема, камери з розпізнаванням номерних знаків, що допомагають виявляти порушення і фіксувати час паркування, зазначають G. Pradhan *et al.* (2025). Інша важлива складова – комунікаційна мережа (бездротові технології Wi-Fi, GSM, LoRaWAN тощо), яка з'єднує датчики, паркомати, контролери та сервери для обміну інформацією. На верхньому рівні архітектури функціонують центральні сервери та

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

хмарні платформи, що збирають і обробляють дані про парковки, а також користувацькі застосунки та веб-інтерфейси, через які водії отримують інформацію про доступні місця, тарифи, можуть резервувати місце або сплатити за парковку дистанційно.

Таким чином, сучасні технології управління паркуванням – це комплекс сенсорів, мереж, програмного забезпечення і алгоритмів, що в сукупності забезпечують інформування, навігацію, контроль та оптимізацію паркування у реальному часі.

СУЧАСНІ НАУКОВІ ПІДХОДИ ДО ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ПАРКУВАННЯМ

Одним із найпотужніших трендів у цій галузі є впровадження технологій Інтернету речей (IoT). IoT забезпечує повсюдну взаємодію пристроїв – сенсори, контролери, камери та інші «розумні» об'єкти збирають дані про парковки та обмінюються ними через мережу в автоматизованому режимі.

Фактично, IoT-підхід перетворює розрізнені парковки на єдину інформаційну систему міста. Наприклад, датчики на парковках оперативно передають інформацію про вільні місця, що дозволяє будувати системи навігації до вільного паркомісця. Такий перехід від «сліпого» пошуку до інформованого підходу економить час водіїв і зменшує зайві кілометри пробігу в пошуках місця.

Дослідження М. А. Mondal *et al.* (2021) показують, що якщо водії заздалегідь отримують дані про наявні паркомісця, це знижує навантаження на дороги і мінімізує явище «декілька машин переслідують одне місце» в години пік. IoT-рішення для паркування часто включають мобільні додатки, які відображають карту доступних місць у реальному часі та можуть пропонувати резервування місця. Резервування парковок через застосунок дозволяє водію забронювати місце наперед, особливо в зонах підвищеного попиту або під час масових заходів. Ба більше, через ті самі додатки можна здійснити безготівкову оплату, що спрощує процес і для користувача, і для оператора парковки. Урядові та комерційні проєкти «smart parking» дедалі частіше інтегруються з міськими інформаційними системами. Наприклад, Н. Robert C *et al.* (2014), зазначають, що, у Сан-Франциско була розгорнута система SFpark із більш ніж 7000 датчиків, яка збирала дані про заповнюваність паркомісць і передавала їх у відкритому доступі водіям через додатки. Цей проєкт продемонстрував ефективність IoT-підходу: за час його дії середній час пошуку паркування та відповідно «круїзний» трафік скоротився приблизно на 50%. У цілому, IoT-технології створюють основу для розумних парковок, що реагують на зміну попиту динамічно та прозоро. Водночас, перед IoT-системами постають виклики масштабованості та стандартизації.

Масове встановлення тисяч сенсорів потребує значних інвестицій та технічного обслуговування, а передані дані повинні надійно захищатися. Огляди Т. Rajabioun *et al.* (2015), відзначають, що сучасні on-street рішення поки що мають проблеми зі масштабованістю – центральні сервери перевантажуються обчисленнями при обслуговуванні великої кількості пристроїв, – а також із приватністю даних, адже відстеження місць і переміщень може збирати персональну інформацію про водіїв. Отже, напрям подальших досліджень – це розробка більш стійких, масштабованих та безпечних IoT-архітектур для паркування, описує М. Ozkaya *et al.* (2024), зокрема із використанням туманних обчислень (fog computing) і децентралізованих підходів, що знижують навантаження на центральні вузли. Діаграма активності користувача з Smart Parking системами зображена на рисунку 1.

На схемі зображено послідовність дій у рамках типового сценарію пошуку паркувального місця у системі Smart Parking. Користувач запускає мобільний додаток, який отримує інформацію про доступні місця від IoT-сенсорів у режимі реального часу. У разі наявності вільного місця система автоматично прокладає маршрут. Якщо ж місць немає, водієві пропонується альтернатива (інша локація або перехоплюючий паркінг). Після паркування сенсор фіксує зайнятість, дані передаються до центрального сервера, де аналітичні модулі оновлюють прогнози та коригують тарифи відповідно до поточної ситуації.

Другим важливим напрямом є розвиток автоматизованих паркувальних систем (APS, Automated Parking Systems). Під цим розуміється механізована парковка, де автомобілі розміщуються та видаються автоматично за допомогою ліфтових та конвеєрних пристроїв, без участі водія. Такі системи фактично виконують роль роботизованого гаража: водій залишає авто на в'їзді, далі платформа або робот переміщує машину на вільне місце у багаторівневому штабелі. Головна перевага APS – економія простору. За рахунок усунення проїздів, пандусів та проміжків для відчинення дверей, автоматизована парковка може вмістити значно більше авто на тій самій площі, ніж традиційний паркінг. Згідно з галузевими оцінками, впровадження APS дозволяє скоротити площу, необхідну для паркування, на 40–80%. Як наслідок, APS стають привабливими для щільної міської забудови, де земля дорога і дефіцитна

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

(історично тому вони набули поширення в країнах на кшталт Японії, Німеччини, Південної Кореї). Окрім того, відсутність необхідності водіям їздити по паркінгу знижує викиди вуглекислого газу – автоматизовані гаражі є більш екологічними за традиційні.

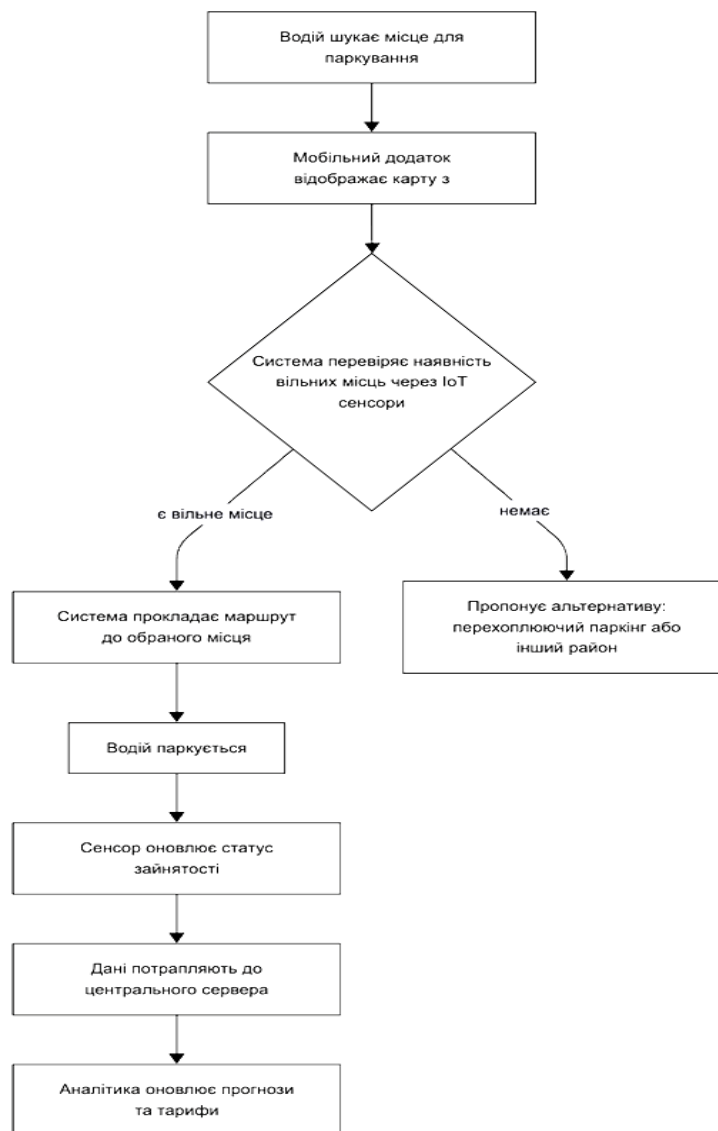


Рисунок 1 – Блок-схема активностей користувача з Smart Parking системами.

Джерело: розроблено автором на основі власних досліджень

Блок-схема архітектури системи управління паркуванням зображена на рисунку 2.

Схема ілюструє функціональну архітектуру інтелектуальної системи управління паркуванням, яка складається з декількох взаємопов'язаних компонентів. На початковому рівні розташовані сенсори (ультразвукові, відеоаналітичні, магнітні, інфрачервоні), які виявляють зайнятість паркомісць у реальному часі. Ці дані надходять до IoT-шлюзів, що здійснюють бездротову передачу інформації за допомогою протоколів LoRaWAN, NB-IoT або LTE Cat-M. Далі інформація передається на центральний сервер або хмарну інфраструктуру (наприклад, AWS IoT, Azure IoT Hub), де здійснюється її обробка.

На цьому етапі задіюються модулі штучного інтелекту та машинного навчання (AI/ML), які прогнозують заповненість, виявляють порушення паркування та формують рекомендації щодо динамічного ціноутворення. Взаємодія з користувачами та іншими зовнішніми системами забезпечується через API-рівень, який інтегрує систему з мобільними застосунками, навігаційними сервісами та платіжними платформами. Користувачі отримують доступ до функцій через мобільний додаток, що дозволяє здійснювати пошук паркомісць, навігацію, оплату та залишення зворотного зв'язку. Паралельно

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

адміністрація міста чи оператор системи має доступ до панелі керування, яка забезпечує моніторинг, аналітику, управління тарифами та інцидентами. Уся історія транзакцій, дій користувачів та подій зберігається в сховищі даних для цілей аудиту, логування та аналітики. Ця архітектура забезпечує масштабованість, модульність і можливість гнучкого налаштування системи під потреби конкретного міста чи оператора.

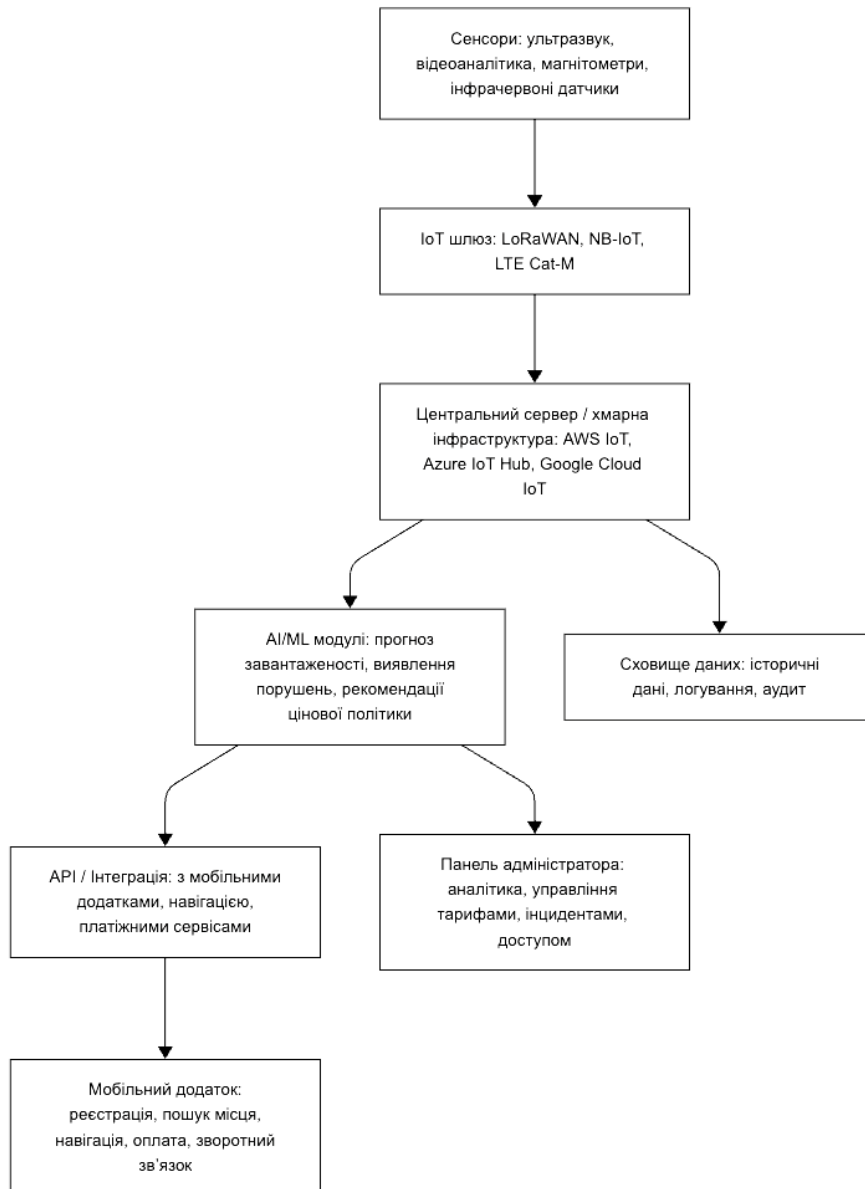


Рисунок 2 – Блок-схема архітектури системи управління паркуванням.

Джерело: розроблено автором на основі власних досліджень

Наукові дослідження автоматизованих парковок торкаються питань надійності та сприйняття користувачами. З одного боку, APS демонструють високу ефективність у збільшенні місткості та можуть підвищити рівень безпеки (усуваючи ризики, пов'язані з маневруванням у тісних гаражах). З іншого боку, певні технічні та психологічні аспекти потребують вирішення. Дослідження функцій автоматичного паркування в автомобілях показало, що повна автоматизація маневру все ще може бути помилковою – навіть сучасні автопілоти інколи паркуються менш точно чи повільніше, ніж досвідчений водій, зазначають E. de Visser *et al.* (2022). В експерименті з Tesla Model X було виявлено, що автоматичний режим успішніше справляється з паралельним паркуванням, ніж з перпендикулярним;

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

втім, учасники доволі довіряли автоматизації, попри її недоліки. Для стаціонарних APS це означає необхідність резервування систем, регулярного технічного обслуговування та зрозумілого інтерфейсу для клієнтів, щоби вони довіряли роботизованому паркуванню. Інше дослідження, присвячене змішаним методам (опитування та експеримент), показало, що водії загалом позитивно сприймають автоматизовані парковки, якщо переконані в їх надійності. Отже, підвищення надійності та швидкості роботи APS – ключ до ширшого впровадження цієї технології.

Одним із сучасних підходів до оптимізації використання паркувальних ресурсів є динамічне ціноутворення. Ця концепція передбачає гнучку зміну тарифів на паркування залежно від поточного попиту, часу доби, локації та інших факторів. Як зазначають дослідники, «динамічне ціноутворення – це метод, що коригує ціну послуги у часі відповідно до попиту та пропозиції задля підвищення доходу» описують М. А. Mondal *et al.* (2021) у роботі.

На практиці це означає, що в години та районах високого попиту вартість паркування підвищується, стимулюючи частину водіїв обирати альтернативи (інший час, інше місце або громадський транспорт), а в періоди низького завантаження ціна знижується, щоби ефективніше заповнювати паркінги. Динамічне тарифування успішно застосовувалося в рамках пілотних проєктів. Найвідоміший з них – SFpark у Сан-Франциско, де тарифи на вуличне паркування переглядалися кожні 6 тижнів на основі цільового показника заповненості 60–80%. Результати були вражаючими: середня заповненість наблизилася до цільового діапазону, а кількість водіїв, що крутилися в пошуках місця, скоротилася приблизно наполовину. Іншими словами, динамічне ціноутворення суттєво зменшило проблему “круїзінгу” за паркомісцем. Наукові роботи Н. Robert C *et al.* (2014), підтверджують ефективність цього підходу. За допомогою ігрового моделювання паркової ситуації (т.зв. serious game) було показано, що водії раціонально реагують на підвищення цін: за вищої вартості ближчих місць вони схильні паркуватися раніше – далі від пункту призначення або на дешевшому парковці – тим самим скорочуючи загальний час пошуку. Така поведінкова зміна і є метою динамічного ціноутворення: за рахунок цінових сигналів вирівняти попит, усунути ситуації, коли кілька авто «полюють» за одним місцем, і зменшити перевантаження в найбільш гарячих точках. Додатковою вигодою є збільшення надходжень для міста або оператора паркінгу – дослідження зазначають, що грамотне динамічне ціноутворення підвищує дохідність паркувальної системи. Структуру витрат на впровадження ключових компонентів системи Smart Parking зображено на рисунку 3.

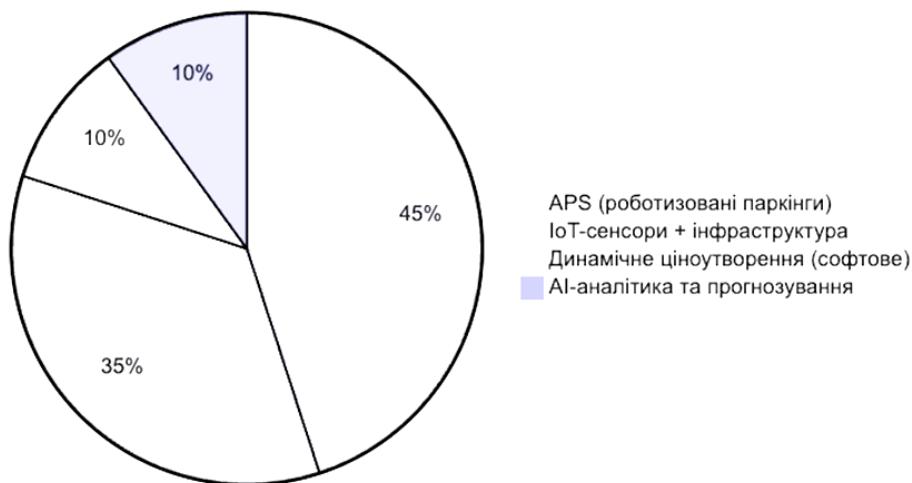


Рисунок 3 – Структура витрат на впровадження ключових компонентів системи Smart Parking.

Джерело: розроблено автором на основі власних досліджень

Найбільшу частку витрат (45%) становлять інвестиції у впровадження автоматизованих паркувальних систем (APS), що включають будівництво або реконструкцію об'єктів, обладнання ліфтовими механізмами та інфраструктурою автоматичного зберігання автомобілів. Другу за величиною статтю становлять витрати на розгортання IoT-інфраструктури (35%), яка охоплює закупівлю сенсорів, шлюзів передачі даних, монтажні роботи та обслуговування мереж. Натомість, впровадження програмних рішень — таких як модулі динамічного ціноутворення (10%) та AI-аналітики (10%) — потребує відносно менше фінансових ресурсів. Це робить їх особливо привабливими для стартових пілотних проєктів, а також у містах з обмеженим бюджетом. Інвестиції в ці програмні компоненти дають

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

змогу досягти помітного ефекту (зменшення заторів, підвищення доходів, інформування користувачів) при відносно невеликих витратах.

Ці кошти можна реінвестувати в транспортну інфраструктуру. Викликом при впровадженні цього підходу є суспільне сприйняття. Водії не завжди позитивно реагують на підвищення цін; тому важлива прозорість та поступовість впровадження. Влада міст, які застосували динамічні тарифи, наголошують на їх перевагах для громади – менше заторів, чистіше повітря, пріоритет мешканцям (через тарифні зони тощо). Для успіху також необхідні сучасні паркувальні лічильники або застосунки, що можуть автоматично застосовувати змінні тарифи і інформувати користувачів. Загалом, динамічне ціноутворення зарекомендувало себе як дієвий інструмент керування попитом: воно доповнює технологічні рішення, впливаючи на поведінку водіїв економічними стимулами.

Сучасні системи генерують великий обсяг даних про паркування – це відкрило простір для застосування методів штучного інтелекту (ШІ) та аналізу даних. Машинне навчання використовується для прогнозування заповненості паркінгів, оптимізації розподілу місць, виявлення порушень тощо. Приміром, у роботі C. Dowlinh *et al.* (2017) описано інтеграцію IoT-датчиків із алгоритмами машинного навчання для прогнозування доступності місць на 15-хвилинні інтервали вперед. Використання моделей регресії з автоматичним підбором параметрів дало змогу досягти точності прогнозу зайнятості паркінгу $R^2 = 0.97$, що істотно покращує інформування водіїв та дозволяє проактивно керувати попитом. Таким чином, ШІ підвищує ефективність паркувальних систем, дозволяючи передбачати пікові навантаження і вживати заходів (динамічне ціноутворення, резервування додаткових місць) до настання перевантаження. Іншим напрямом є застосування комп'ютерного зору та глибинного навчання для моніторингу парковок. На заміну або доповнення точковим датчикам приходять камери, які за допомогою алгоритмів розпізнавання зображень здатні визначати наявність авто на десятках парковочних місць одночасно. У дослідженні G. Pradhan *et al.* (2025) продемонструвало систему з камерою, що охоплює кілька місць: поєднання оптичного розпізнавання номерів та інфрачервоних сенсорів забезпечило 95% точності виявлення авто вдень і ~90% уночі. Автоматизація контролю дозволила зменшити похибку обліку зайнятих місць до <5% (проти ручного контролю) і знизити випадки неправильного нарахування плати на 90%. Як наслідок, оператор парковки підвищив збір платежів на ~20%, а водії отримали більш прозорий і справедливий сервіс. Цей приклад ілюструє, що AI-рішення здатні не лише автоматизувати рутинні задачі, а й значно підвищити точність та економічний ефект управління паркуванням. Останнім часом дослідники також активно вивчають алгоритми оптимального розподілу місць та маршрутів. Використовуються методи теорії ігор, багатоагентні системи, які координують групу автомобілів, спрямовуючи їх на різні парковки для запобігання концентрації на одній. Застосування графових нейронних мереж (GCNN) для аналізу просторово-часових даних паркування показало найкращі результати в короткостроковому прогнозуванні зайнятості серед кількох тестованих моделей. Це свідчить про великий потенціал глибинного навчання враховувати складні кореляції у поведінці водіїв та завантаженості міських районів. В оглядовій роботі 2023 року відзначено перспективність поєднання різних технологій ШІ. Зокрема, у роботі M. A. Shroud *et al.* (2023), рекомендується для відкритих парковок (open parking lots, без шлагбаумів) використовувати комп'ютерний зір спільно з згортковими нейромережами (CNN) для детекції вільних місць, а керування паркуванням розглядати як задачу для багатоагентних систем (multi-agent systems), де агенти-автомобілі обмінюються інформацією і спільно ухвалюють рішення. Такі підходи дозволять врахувати різноманітні фактори (погодні умови, поведінку водіїв, випадкові події) та зробити систему більш стійкою. Однак впровадження ШІ в міське паркування також породжує питання приватності (як забезпечити анонімність даних про переміщення авто) та відповідальності (як система діятиме у разі збою алгоритму). Це поле для подальших досліджень, у тому числі в етико-правовій площині.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ПІДХОДІВ

Розглянуті підходи до вдосконалення технологій управління паркуванням взаємно доповнюють один одного, проте мають різні акценти. IoT-технології забезпечують основу інфраструктури: вони найефективніші у зборі оперативної інформації та інформуванні користувачів. З їх допомогою зменшується час пошуку місця і відповідно довжина поїздки на 10–30%, а використання паркувального простору покращується (деякі дослідження вказують на підвищення коефіцієнта використання місць з ~60–70% до 85–95% завдяки сенсорним системам. Втім, для повного розкриття потенціалу IoT потрібні великі інвестиції в сенсорні мережі та підтримку їх працездатності, а також вирішення питань безпеки даних. Автоматизовані системи (APS) радикально підходять до проблеми браку місця – вони фізично реорганізують простір, дозволяючи розмішувати більше машин на меншій території. Їхній ефект

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

особливо помітний у щільних центрах міст, де ціна землі дуже висока. У містах, які стикаються з дефіцитом паркомісць, APS можуть стати альтернативою будівництву нових гаражів – адже роботизований паркінг можна вмонтувати під землю або вбудувати в будівлю. Проте недоліком залишається висока вартість впровадження таких систем і складність їх експлуатації. Якщо IoT-рішення можна реалізувати поступово (встановлюючи датчики квартал за кварталом), то APS вимагає великого проекту одразу. Тому нині вони частіше зустрічаються в приватних об'єктах (елітні житлові комплекси, офісні центри) або в містах з дуже щільною забудовою. Надійність APS має вирішальне значення: навіть поодинокі збої, коли автомобіль затримується всередині або виникає поломка ліфта, можуть негативно вплинути на довіру користувачів. Тому виробники впроваджують резервні системи, дистанційний моніторинг стану обладнання тощо.

Динамічне ціноутворення відрізняється тим, що це більше управлінський інструмент, ніж технічний. Воно відносно недороге у впровадженні – потрібне радше програмне забезпечення для моніторингу заповненості та зміни тарифів, ніж фізичні пристрої. Ефективність цього підходу залежить від еластичності попиту: якщо водії готові змінювати свою поведінку через ціни, то виграш очевидний – зникають перенавантажені зони і зменшуються затримки при пошуку місця. Але там, де альтернативи парковці обмежені (наприклад, відсутній громадський транспорт або паркінги в іншому місці), надто високі ціни можуть просто викликати невдоволення без позитивного ефекту. Тому динамічне ціноутворення повинно супроводжуватися розвитком альтернатив: Park-and-Ride, громадського транспорту, перехоплюючих стоянок за межами центру тощо. Важливо й те, що технології IoT та AI фактично є необхідною базою для динамічного ціноутворення – без датчиків та систем прогнозування місту складно визначити оптимальні тарифи та контролювати їх дію в режимі реального часу.

Штучний інтелект та аналіз даних виступають своєрідним «мозком» усієї системи. Вони перетворюють масиви сирих даних на знання для прийняття рішень. У малих містах із нескладною парковою ситуацією, можливо, можна обійтись і без складних алгоритмів – достатньо базової автоматизації. Але у мегаполісах з мільйонами автомобілів AI-алгоритми незамінні для оптимізації: жодна людина не впорається з ручним керуванням потоками в режимі 24/7, тоді як комп'ютерні моделі здатні знаходити оптимальні рішення розподілу місць, передбачати проблеми і навіть автономно регулювати правила (наприклад, тимчасово вводити заборону паркування на певних вулицях при наближенні до перевантаження). Водночас, складні AI-системи потребують ретельного тестування і верифікації, щоб уникнути помилок. Більше того, одним із застережень є питання приватності та етики: дані про переміщення та парковки автомобілів можуть розглядатися як чутливі, тому системи повинні гарантувати анонімність і безпеку інформації. Отже, порівняльний аналіз показує, що найкращий результат досягається при поєднанні підходів: IoT забезпечує дані, AI – їх обробку та прогнози, динамічне ціноутворення – регуляцію попиту, а автоматизовані парковки – максимальне використання простору. Кожна технологія закриває свою ділянку проблеми, і разом вони формують комплексну систему управління паркуванням майбутнього.

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ТЕХНОЛОГІЙ УПРАВЛІННЯ ПАРКУВАННЯМ

Перспективи розвитку лежать у площині інтеграції різних технологічних рішень в єдину міську екосистему. В майбутньому системи управління паркуванням стануть невід'ємною частиною концепції Smart City, взаємопов'язаною з іншими підсистемами – управлінням рухом, громадським транспортом, інформаційними сервісами для мешканців. Уже зараз спостерігається тенденція до об'єднання окремих додатків і сервісів. Наприклад, навігаційні програми отримують доступ до даних паркувальних API, щоб одразу прокладати маршрут не лише до точки призначення, а й до найближчого вільного паркомісця поблизу. В автомобілях нового покоління з'являються бортові системи, які здатні самостійно шукати інформацію про паркування. Smart vehicle може обмінюватися даними про зайняті місця з іншими авто через V2V (Vehicle-to-Vehicle) або зв'язуватися з міськими сенсорами через V2I/S2V (Sensor-to-Vehicle) комунікації. Це означає, що автомобілі майбутнього будуть проактивно знаходити паркування, мінімізуючи участь людини у цьому процесі. Інтеграція також означає сумісність різних платформ. Нині ринок пропонує багато розрізнених рішень від різних постачальників – від датчиків до програмного забезпечення. Стандартизація протоколів передачі даних (NAP – parking data standard, DATEX II, etc.) дозволить містам уникнути «війни стандартів» і легко масштабувати системи. Крім того, перспективним є підхід Mobility as a Service (MaaS), де паркування розглядається як складова єдиної послуги мобільності. Наприклад, користувач через один застосунок планує подорож: резервує спершу паркомісце на перехоплюючому паркінгу, потім квиток на міську електричку до центру. Такі комплексні рішення стимулюють відмову від поїздок особистим авто у центр міста, що сприяє сталому розвитку. Отже,

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

конвергенція паркувальних технологій з іншими транспортними сервісами – важливий напрям майбутнього. Не менш актуальним є питання масштабування: системи, успішно випробувані в окремих районах чи на окремих стоянках, слід поширити на рівень усього міста. Це потребує не лише технічних зусиль, а й управлінських – розробки відповідних міських політик. Деякі міста світу вводять вимогу, щоб усі нові комерційні паркінги були оснащені стандартним набором сенсорів та підключені до міської інформаційної мережі. Інші стимулюють приватних операторів ділитися даними про заповненість (наприклад, через відкриті дані або партнерські угоди). В майбутньому можлива глобальна мережа паркування: так само як зараз можна в реальному часі бачити ситуацію на дорогах, користувачі зможуть бачити ситуацію з паркуванням в масштабах цілого міста чи регіону.

Для України впровадження сучасних паркувальних технологій є як викликом, так і можливістю. У великих містах – Києві, Харкові, Львові, Одесі – проблема хаотичного паркування стоїть дуже гостро: історичні центри перевантажені автомобілями, бракує парковок, а культура дотримання правил паркування ще формується. Традиційно управління паркуванням в українських містах обмежувалося встановленням паркоматів та роботою інспекторів з евакуаторами. Однак останніми роками з'явилися зрушення. Зокрема, у Києві впроваджено електронну оплату парковки через мобільний застосунок, посилено контроль за несплатою (працює система автофіксації порушень паркування з допомогою камер на інспекторських авто – т.зв. «паркувальні котики») – усе це елементи цифровізації. Наступний крок – перехід до проактивних, «розумних» систем. Вже існують пілотні проекти: в рамках ініціативи Kyiv Smart City тестувалися датчики зайнятості на парковках у центрі міста, IT-компанії розробляють програми навігації до вільних місць. Наприклад, українська IT-компанія SoftServe у 2020 р. повідомила про створення прототипу smart-parking системи з машинним навчанням для прогнозування зайнятості місць. Хоча це поки локальні ініціативи, вони демонструють потенціал вітчизняних фахівців і готовність міської влади до інновацій. Можливості для України включають запозичення найкращих світових практик і їх адаптацію. Міста можуть уникнути «набору власних шишок», скориставшись досвідом міст, що вже впровадили динамічне ціноутворення чи IoT-парковки. Наприклад, Львів може вивчити досвід Сан-Франциско або Барселони у впровадженні датчиків і диференційованих тарифів. Також Україна має конкурентну перевагу – сильний IT-сектор, здатний розробляти програмні рішення локально, що може знизити вартість впровадження. Вартість – один з головних чинників: бюджети українських міст обмежені, і тому необхідно шукати фінансові моделі (ДПП, інвестори, гранти міжнародних проектів), щоб профінансувати обладнання сенсорами хоча б центральних зон міст. Виклики включають і законодавчі аспекти. Потрібно врегулювати питання використання камер і персональних даних (щоб не порушувати право на приватність при відстеженні номерів), визначити процедури динамічного зміни тарифів (нині тарифи затверджуються міськрадою і їх частина зміна ускладнена нормативно). Але поступово законодавство оновлюється: так, прийнято закон про паркування (2017), який дозволив фотофіксацію порушень. Наступні кроки могли б узаконити використання автоматичних систем контролю, визначити статус даних сенсорів як офіційних доказів тощо. З точки зору технічної інфраструктури, українські міста потребують модернізації: не всюди є навіть належне освітлення чи розмітка парковок, тож спершу слід упорядкувати базові речі. Однак це можливість «стрибнути» одразу в нову еру, минаючи застарілі технології. Наприклад, замість встановлення застарілих паркоматів можна одразу інвестувати в сучасні паркомати із сенсорами та онлайн-зв'язком або взагалі зробити ставку на cashless-систему з оплатою лише через смартфон – що в Києві вже частково реалізовано. Перспективно виглядає інтеграція паркувальних сервісів з популярними в Україні навігаційними службами (Google Maps, Waze) – щойно міста почнуть надавати дані про зайнятість, ці сервіси зможуть показувати їх водіям, підвищуючи зручність. Для цього міста повинні відкрити свої дані або об'єднатися з розробниками через API. Нарешті, розвиток технологій управління паркуванням в Україні створює і соціальний ефект. Покращення ситуації з паркуванням означатиме менше стресу для водіїв – а опитування показують, що до 48% водіїв знаходять процес пошуку місця дуже стресовим. Також це підвищить привабливість центрів міст для пішоходів і бізнесу, адже зникне хаос на тротуарах, покращиться екологія. Отже, впровадження розумних парковок можна розглядати як частину більш широкої стратегії сталого розвитку міського транспорту в Україні.

ВИСНОВКИ

Сучасні міста стикаються з серйозними викликами у сфері паркування, які суттєво впливають на трафік, екологію та якість життя мешканців. Аналіз засвідчив, що вирішення цих проблем потребує комплексного підходу, який охоплює інновації в апаратних рішеннях, цифрових платформах і міському управлінні. Технології Інтернету речей забезпечують збір даних у режимі реального часу, дозволяючи

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

оперативно інформувати водіїв та скорочувати час пошуку місця. Автоматизовані паркувальні системи суттєво підвищують місткість об'єктів і рівень безпеки, хоча й потребують значних інвестицій. Динамічне ціноутворення довело свою ефективність як засіб регулювання попиту, сприяючи більш рівномірному використанню простору, зменшенню круїзного трафіку й підвищенню доходів на розвиток інфраструктури. Інтеграція алгоритмів штучного інтелекту дає змогу створити адаптивні системи, що прогнозують завантаженість, оптимізують розподіл паркомісць, виявляють порушення й автоматично регулюють тарифи. Поєднання IoT, AI та динамічного управління формує нову парадигму – сервіс паркування, що діє подібно до бронювання квитків: із гарантією доступності, прозорими умовами та максимальним комфортом для користувача. Для України це не лише технологічне, а й стратегічне питання. Найбільш доцільним напрямом є поетапне впровадження Smart Parking-рішень у центральних районах міст із подальшим масштабуванням. Доцільно створити єдину міську платформу збору та візуалізації даних, інтегровану з навігаційними та платіжними сервісами, й супроводжувати технічне впровадження нормативними змінами та інформаційною підтримкою. Особливу увагу слід приділити залученню приватного сектору через механізми державно-приватного партнерства, відкриті API та стимулювання інновацій.

Впровадження таких підходів дає змогу перетворити паркування з джерела проблем на інструмент формування сталої, зручної й ефективної міської мобільності. Паркувальні системи можуть стати повноцінною частиною транспортної політики — інтегрованою, цифровізованою та орієнтованою на мешканця. Це створює передумови для підвищення конкурентоспроможності міст, зменшення навантаження на довкілля й підвищення загальної якості міського середовища.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Dowling C., Fiez T., Ratliff L., Zhang B. How Much Urban Traffic is Searching for Parking? arXiv:1702.06156, 2017. doi: <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1702.06156>.
2. Barriga J.J. et al. Smart Parking: A Literature Review from the Technological Perspective. Applied Sciences, 9(21):4569, 2019. doi: <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/21/4569>.
3. Mondal M.A. et al. Smart parking management system with dynamic pricing. Journal of Ambient Intelligence and Smart Environments, 13(1):1–22, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.3233/AIS-210615>.
4. Alahmadi S. et al. Towards Scalable and Privacy-Enhanced On-Street Parking Management: A Roadmap for Future Inquiry. Electronics, 12(19):4160, 2023. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2015.2428705>.
5. Nassar Y.F. et al. Challenges and Opportunities in Smart Parking Sensor Technologies. Int. J. of Electrical Engineering and Sustainability, 1(3):44–59, 2023. doi: https://www.researchgate.net/publication/372412628_Challenges_and_Opportunities_in_Smart_Parking_Sensor_Technologies.
6. Geva S. et al. Getting the prices right: Drivers' cruising choices in a serious parking game. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 163:153–167, 2022. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2015.2428705>.
7. Antoska V. et al. Machine Learning Models and Mathematical Approaches for Predictive IoT Smart Parking. Sensors, 25(7):2065, 2025. doi: <http://dx.doi.org/10.48550/arXiv.1702.06156>.
8. Holínka A. Intelligent car parking management system. Master's thesis – Sumy State University, 2020. doi: <https://essuir.sumdu.edu.ua/handle/123456789/79551>.
9. Smart Parking System with Dynamic Pricing, Edge-Cloud and IoT (Case Study). – In: Kabashkin I. et al. (Eds.) Reliability and Statistics in Transportation and Communication, RelStat 2020. Springer, 2021. doi: <http://dx.doi.org/10.3233/AIS-210615>.
10. Rajabioun T., Ioannou P. On-Street and Off-Street Parking Availability Prediction Using Multivariate Spatiotemporal Models. IEEE Trans. Intelligent Transportation Systems, 16(5):2913–2924, 2015. doi: <http://dx.doi.org/10.1109/TITS.2015.2428705>.
11. Ahmed M. et al. Smart parking systems: Comprehensive review based on various aspects. Results in Engineering, 11:100277, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07050>.

Надійшла до редакції 15.05.25 р.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

КОПИЦЯ ВАДИМ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – аспірант кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, **e-mail: vadymkopytsia@gmail.com**

КВЕТНИЙ РОМАН НАУМОВИЧ – д.т.н., професор кафедри автоматизації та інтелектуальних інформаційних технологій, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна, **e-mail: rkvetny@vntu.edu.ua**

Vadym Kopytsia, Roman Kvyetnyy

ANALYSIS OF APPROACHES TO IMPROVING INTELLIGENT PARKING MANAGEMENT TECHNOLOGIES

Vinnytsia National Technical University,

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

УДК 004.92

О.Н. РОМАНЮК, В.С. ПАВЛОВ, Н.В. ТІТОВА,
С.О. РОМАНЮК, В.П. МАЙДАНЮК

ВИКОРИСТАННЯ НЕЙРОГАРНІТУР ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ЗАХВОРЮВАНЬ

*Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, Вінниця, Україна,
e-mail: rom8591@gmail.com*

Національний університет «Одеська політехніка», пр. Шевченка, 1 65044, м. Одеса, Україна

Анотація. У статті висвітлено сучасні підходи до використання нейрогарнітур у діагностиці психоневрологічних захворювань, серед яких депресія, тривожні стани, епілепсія, шизофренія, хвороба Паркінсона та хвороба Альцгеймера. Основна увага зосереджена на реєстрації та аналізі електроенцефалографічних сигналів, які забезпечують неінвазивну оцінку функціонального стану головного мозку. Розкрито значення ритмічної активності різних частотних діапазонів — зокрема альфа-, бета-, тета- і дельта-хвиль — як маркерів певних розладів. Показано, що при депресії типово спостерігається зниження альфа-активності у лівій лобовій корі, а при тривожних розладах — підвищення високочастотної бета-активності. Проаналізовано зміни у спектральному складі сигналів при епілепсії, зокрема вогнищеві збурення та пароксизмальні комплекси, які можна реєструвати за допомогою нейрогарнітур у клінічних або домашніх умовах. У статті також наводиться інформація щодо зменшення когерентності та варіативності EEG-сигналів при хворобі Альцгеймера та змін електричної активності у пацієнтів з хворобою Паркінсона. Значна увага приділена можливості використання нейрофідбек-технологій у рамках когнітивної та повсякденної реабілітації, що базуються на активному контролі пацієнтом власних електрофізіологічних реакцій. Наголошено на практичній доцільності використання нейрогарнітур для початкового скринінгу стану пацієнта, моніторингу динаміки лікування та оцінювання ефективності психотерапевтичних і фармакологічних підходів. У підсумку зроблено висновок, що нейрогарнітури відкривають нові можливості для швидкої, безпечної та економічно доступної діагностики розладів нервової системи у широкому колі пацієнтів різного віку.

Ключові слова: нейрогарнітури, електроенцефалографія, психоневрологічні розлади, депресія, тривожні стани, нейрофідбек, функціональна діагностика

Abstract. The article highlights modern approaches to the use of neuroheadsets in the diagnosis of psychoneurological diseases, including depression, anxiety disorders, epilepsy, schizophrenia, Parkinson's disease, and Alzheimer's disease. The main focus is on the registration and analysis of electroencephalographic signals, which provide a non-invasive assessment of the functional state of the brain. The significance of rhythmic activity of various frequency ranges — in particular, alpha, beta, theta, and delta waves — as markers of certain disorders is revealed. It is shown that depression typically exhibits a decrease in alpha activity in the left frontal cortex, and anxiety disorders typically exhibit an increase in high-frequency beta activity. Changes in the spectral composition of signals in epilepsy are analyzed, in particular, focal disturbances and paroxysmal complexes, which can be recorded using neuroheadsets in clinical or home conditions. The article also provides information on the reduction of coherence and variability of EEG signals in Alzheimer's disease and changes in electrical activity in patients with Parkinson's disease. Considerable attention is paid to the possibility of using neurofeedback technologies within the framework of cognitive and everyday rehabilitation, which are based on the patient's active control of their own electrophysiological reactions. The practical feasibility of using neuroheadsets for the initial screening of the patient's condition, monitoring the dynamics of treatment and assessing the effectiveness of psychotherapeutic and pharmacological approaches is emphasized. As a result, it is concluded that neuroheadsets open up new opportunities for rapid, safe and economically accessible diagnostics of nervous system disorders in a wide range of patients of different ages.

Keywords: neuroheadsets, electroencephalography, neuropsychological disorders, depression, anxiety states, neurofeedback, functional diagnostics

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-168-177

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

ВСТУП

Використання нейрогарнітур [1-7] у медичній діагностиці набуває дедалі більшої актуальності завдяки інтеграції досягнень нейронаук, біоінженерії та цифрових технологій. З огляду на стрімке зростання кількості пацієнтів із неврологічними та психічними розладами — зокрема хворобою Альцгеймера, Паркінсона, епілепсією, депресією та тривожними станами — виникає потреба у нових методах раннього виявлення порушень мозкової діяльності. Сучасні нейрогарнітури [8-14], що працюють на основі електроенцефалографічного моніторингу, забезпечують оперативну реєстрацію мозкових сигналів без інвазивного втручання й складного лабораторного обладнання. Завдяки вдосконаленню бездротових технологій, зменшенню габаритів пристроїв та використанню інтелектуальних алгоритмів обробки даних, ці системи стають доступними не лише для дослідницьких цілей, а й у повсякденній медичній практиці. Їхня значущість зростає і в контексті домашнього моніторингу, що відповідає концепції індивідуалізованого підходу до охорони здоров'я. Крім того, здатність нейрогарнітур фіксувати специфічні візерунки електричної активності мозку, характерні для окремих захворювань, сприяє підвищенню точності діагностики. У рамках цифрової еволюції медицини такі пристрої слугують основою для побудови телемедичних рішень, інтелектуальних систем підтримки прийняття рішень і нейроінтерфейсів нового покоління, забезпечуючи прогрес у галузі діагностики, скринінгу та реабілітації.

1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ

Нейрогарнітура [6, 7, 11] є високотехнологічним пристроєм, призначеним для безконтактного вимірювання електричної активності головного мозку за допомогою датчиків, розташованих на поверхні голови. Її функціонування базується на електроенцефалографічному принципі, що дозволяє фіксувати незначні електричні імпульси, які утворюються в результаті роботи нейронів. Після зчитування сигнали проходять етапи підсилення, цифрової фільтрації та обробки за допомогою програмних засобів. Конструктивно такі пристрої можуть містити від одного до кількох десятків каналів, що визначає їхню чутливість і можливі сфери використання. Нейрогарнітури активно застосовуються в дослідженнях мозкової активності, у терапевтичних методах зворотного біологічного зв'язку, у розробці систем керування пристроями силою думки (BCI), а також у навчальному та клінічному середовищі. Зі зростанням точності сенсорів, удосконаленням алгоритмів аналізу сигналів та розвитком бездротових технологій такі пристрої стають усе більш доступними для широкого кола користувачів.

Зовнішній вигляд гарнітури залежить від її класу та складності передбачуваного використання (рис. 1). Професійні – дають набагато більшу точність, але виглядають не так естетично.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд гарнітур: а – споживчого класу; б – лабораторного рівня; в – професійна або лабораторна ЕЕГ гарнітура для досліджень

Розвиток мікроелектронної техніки призвів до того, що сучасні електроенцефалографи є апаратно-програмними комплексами, які дозволяють якісно зареєструвати ЕЕГ сигнал та опрацювати його потужними математичними методами. Математико-статистичні методи аналізу дають змогу дати точну чисельну оцінку параметрам ЕЕГ, встановити закономірності узгодженості сигналу ЕЕГ у просторі і часі. Новітні математичні методи дозволяють робити висновки щодо локалізації у глибині

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

мозку різних компонентів його активності, що має неабияке значення в першу чергу при клінічній діагностиці вогнища захворювання.

Реєстрація і аналіз ЕЕГ у сучасній науці і клініці здійснюється за допомогою комп'ютерних електроенцефалографічних комплексів, які складаються із кількох функціональних блоків [11]:

- блок реєстрації сигналу;
- блок фільтрів та підсилювачів;
- аналогово-цифровий перетворювач (АЦП);
- інтерфейсний блок;
- комп'ютер та програмне забезпечення для зберігання, візуалізації та математичного аналізу сигналу.

В електроенцефалографії використовують металеві електроди з хлорсрібним покриттям. Електроди бувають сухі (без гелю) або вологі (з використанням гелю для зменшення опору).

Основні схеми вимірювання сигналу ЕЕГ [11]:

- монополярна схема: Вимірювання проводиться між однією активною точкою на поверхні скальпу та індиферентною точкою, зазвичай мочкою 8 вуха або сумарним електродом, який є узагальненим відведенням від усіх електродів на скальпі.
- біполярна схема: Ця схема вимірює різницю потенціалів між двома електродами, розташованими безпосередньо над мозком. Такий підхід дозволяє виявити електричні відмінності між різними частинами мозку, що особливо корисно для ідентифікації місцевих аномалій у мозковій активності (рис. 2).

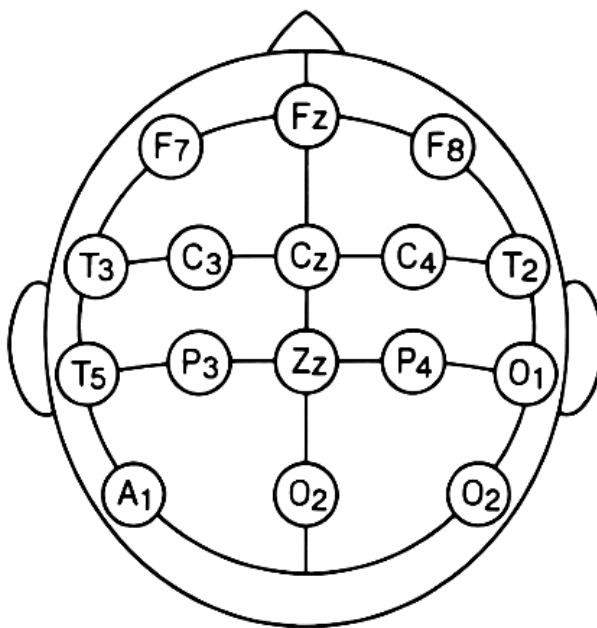


Рисунок 2 – Схеми відведень ЕЕГ

На рисунку 1 представлено стандартну схему [2, 4, 9] електродного розташування для електроенцефалографії — міжнародну систему 10–20, яка застосовується для точного й відтворюваного встановлення електродів на поверхні голови. Ця методика базується на вимірюванні відстаней між основними орієнтирами черепа — носом, потилицею, вухами та тім'яною частиною — і встановленні електродів на 10% або 20% від цих відстаней. Кожен електрод позначено буквено-цифровим кодом: літери вказують на зони мозку — F (лобова), T (скронева), C (центрально-задня), P (тім'яна), O (потилична), а цифри — на півкулю: непарні — ліва, парні — права. Позначення з літерою Z використовуються для електродів, розміщених уздовж умовної серединної лінії (наприклад, Fz, Cz, Pz). Електроди A1 і A2 фіксуються біля вушних раковин і слугують референтними або нейтральними. Центральні точки, такі як Cz, займають ключові позиції для контролю активності в сенсомоторній зоні. Завдяки цій схемі забезпечується рівномірне охоплення електродами кори головного мозку, що дозволяє ефективно виявляти функціональні зміни та локалізовані патології — зокрема, при розладах сну, епілепсії, тривожних або депресивних станах [2]. Система 10–20 уніфікована на міжнародному рівні, що сприяє узгодженості даних між різними медичними установами та науковими центрами.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Нейрогарнітури функціонують на основі кількох фундаментальних фізичних принципів [3], з яких найпоширенішим є ЕЕГ. Цей метод ґрунтується на реєстрації слабких електричних сигналів, що виникають у корі головного мозку внаслідок синхронної активності нейронів. Такі сигнали мають дуже малу амплітуду — у межах десятків мікрвольт — і охоплюють частотний діапазон від долей герца до сотень герц. Електроди, закріплені на шкірі голови, вловлюють ці коливання та передають їх на обчислювальні модулі для подальшого аналізу. У деяких експериментальних або дослідницьких нейроінтерфейсах також використовуються інші фізичні явища. Наприклад, магнітоенцефалографія базується на законі індукції Фарадея і дозволяє реєструвати магнітні поля, що генеруються електричними струмами в нейронах, хоча через складність і вартість її застосування обмежене. Іншим підходом є спектроскопія ближнього інфрачервоного діапазону, що вимірює зміни в поглинанні інфрачервоного світла тканинами голови, пов'язані з рівнем насичення крові киснем, і таким чином непрямо оцінює мозкову активність. У низці моделей нейрогарнітур також використовується оцінка електричного імпедансу тканин, що реагує на зміни кровообігу та фізіологічного стану. Крім того, в оптичних сенсорах застосовується фотоелектричний ефект, що дає змогу перетворювати світлове випромінювання у вимірюваний електричний сигнал. Загалом, основним фізичним принципом у нейрогарнітурах залишається біоелектрична активність головного мозку, яку references

Сітовий ринок нейрогарнітур [3, 16] демонструє стійке зростання, зумовлене розвитком технологій, поширенням нейронауки та підвищенням попитом на пристрої для моніторингу мозкової активності в медицині, освіті та споживчому секторі. За оцінками дослідницької компанії Grand View Research, у 2024 році глобальний ринок носимих ЕЕГ-гарнітур (електроенцефалографічних пристроїв) досягнув 134,7 млн доларів США, а до 2030 року прогнозується його зростання до 244,9 млн доларів із середньорічним темпом (CAGR) на рівні 10,4 %. Особливий інтерес викликає сегмент бездротових ЕЕГ-гарнітур, де річний обсяг уже у 2023 році становив понад 789 млн доларів США, а до 2030 року очікується зростання до 1,34 млрд доларів (CAGR близько 7,9 %).

Важливою тенденцією є розвиток імплантованих BCI-технологій — компанії на кшталт Neuralink, Paradromics, Precision Neuroscience та Synchron активно просувають клінічні випробування з прямого з'єднання мозку з комп'ютером. Згідно з останніми оцінками, кількість встановлених імплантованих нейроінтерфейсів подвоїться впродовж наступного року. Їх використання розширюється від керування протезами до покращення мовлення, руху та навіть емоційної регуляції.

Таким чином, ринок нейрогарнітур і BCI-систем перебуває на етапі активного зростання з високим рівнем технологічної інноваційності. У найближче десятиліття очікується стрімке розширення комерційних застосувань як у медичній, так і в споживчій сферах. Це відкриває нові можливості для досліджень, стартапів і трансформації систем охорони здоров'я, освіти та людсько-комп'ютерної взаємодії.

Мета статті — аналіз використання галузей використання нейрогарнітур для діагностування захворювань.

2. ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Діагностування хвороби Альцгеймера за допомогою нейрогарнітур [3, 8] базується на виявленні характерних змін у мозковій електричній активності, що виникають ще на ранніх стадіях захворювання. Хвороба Альцгеймера супроводжується поступовим руйнуванням нейронних зв'язків, що проявляється у сповільненні мозкової активності. Типовими ЕЕГ-ознаками при цьому є зменшення потужності альфа-ритму (8–12 Гц), який у нормі домінує в стані спокою, і збільшення активності повільніших хвиль — тета (4–7 Гц) і дельта (0,5–3 Гц). Ці зміни особливо помітні в тім'яних і скроневих ділянках, які першими уражаються при хворобі Альцгеймера. Крім того, зменшується когерентність між зонами мозку — тобто слабшає узгодженість між сигналами різних ділянок, що вказує на погіршення інтеграції інформації в мозку. Нейрогарнітури дають змогу виконати попередній скринінг когнітивних порушень без необхідності повноформатної лікарняної апаратури. Під час тестування пацієнт виконує прості когнітивні завдання або перебуває в стані спокою з відкритими та закритими очима, а нейрогарнітура записує ЕЕГ-сигнали. Програмне забезпечення виконує спектральний аналіз, обчислює співвідношення тета/альфа, частотну симетрію, когерентність і топографічний розподіл ритмів [3].

Таким чином, нейрогарнітури дозволяють провести швидкий, безпечний і доступний скринінг когнітивних функцій, виявити початкові електрофізіологічні ознаки хвороби Альцгеймера [8] та спрямувати пацієнта на більш глибоке обстеження. Такий підхід особливо важливий на ранніх стадіях, коли клінічні симптоми ще не виражені, але мозок вже демонструє відхилення у своїй електричній активності.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Діагностування хвороби Паркінсона за допомогою нейрогарнітур [3, 10] базується на виявленні змін у мозковій електричній активності, пов'язаних із порушенням роботи дофамінергічної системи та моторного контролю. Нейрогарнітури, що зчитують EEG-сигнали, дозволяють зафіксувати характерні ритмічні та просторові аномалії, які супроводжують це нейродегенеративне захворювання навіть на початкових стадіях.

Основною особливістю електроенцефалографічної активності при хворобі Паркінсона є зниження потужності бета-ритму (13–30 Гц), який у здорових людей домінує під час рухової активності та концентрації. У пацієнтів з Паркінсоном спостерігається гіпоактивація моторних зон кори (особливо у центральних ділянках — електроди Cz, C3, C4), що пов'язано з порушенням генерації рухових імпульсів. Одночасно відмічається підвищення тета- (4–7 Гц) та дельта-активності (0,5–3 Гц), що свідчить про загальне уповільнення нейронної обробки [10]. Ще однією характерною ознакою є зниження функціональної когерентності між лобовими та моторними зонами, а також дисбаланс у ритмах півкуль, що порушує інтеграцію сенсорної та моторної інформації. У багатьох випадках EEG-сигнали демонструють знижену варіативність і тенденцію до ригідності частотної структури, що корелює з клінічною симптоматикою — сповільненістю рухів, тремором, порушенням автоматизованої моторики.

Для діагностування хвороби Паркінсона за допомогою нейрогарнітури пацієнт зазвичай проходить протокол з виконанням рухових або когнітивно-моторних завдань, під час яких реєструється мозкова активність. Такі завдання можуть включати уявлення руху контроль рухів очей або дотик до цілей. Під час виконання аналізується, чи відповідає моторна активація очікуваному EEG-профілю.

Програмне забезпечення нейрогарнітур (наприклад, OpenBCI, NeuroPype, EmotivPRO) виконує спектральний аналіз, обчислює індекси функціональної активності, а також може застосовувати нейронні мережі, натреновані для виявлення Паркінсон-подібних змін [3, 7, 10].

Таким чином, нейрогарнітури не замінюють повноцінної клінічної діагностики хвороби Паркінсона, однак вони можуть використовуватись як додатковий інструмент для раннього виявлення, моніторингу прогресу захворювання, а також для нейротренінгу або біозворотного зв'язку при реабілітації. Вони особливо корисні у дослідницьких і телемедицинських умовах, де потрібне швидке, неінвазивне та портативне оцінювання моторної функції мозку [3, 10].

Діагностування епілепсії за допомогою нейрогарнітур [3, 9] ґрунтується на виявленні характерних патологічних електричних імпульсів мозку, які свідчать про гіперзбудливість нейронів. Нейрогарнітури, які реєструють електроенцефалографічні (EEG) сигнали, дозволяють виявити як міжприступну активність, так і потенційні зони виникнення нападів [9].

Основною ознакою епілепсії в EEG є пароксизмальні розряди, які можуть проявлятися як: спайки (гострі хвилі тривалістю менше 70 мс), спайк-хвильові комплекси (поєднання гострого імпульсу і повільної хвилі), пік-хвилі з частотою 3 Гц — типовий патерн при абсанс-епілепсії, поліспайкові розряди — при фокальних або генералізованих формах [9].

Під час міжприступного періоду ці сигнали можуть бути короточасними й не супроводжуватись клінічними симптомами, але добре виявляються за допомогою чутливої EEG-реєстрації. Для фіксації активності використовуються багатоканальні нейрогарнітури з розміщенням електродів над лобовими, тім'яними, скроневими та потиличними ділянками.

У пацієнтів з епілепсією часто спостерігається підвищена активність у дельта- (0,5–3 Гц) і тета-діапазоні (4–7 Гц), зниження альфа-активності, а також аномальна синхронізація сигналів між ділянками кори головного мозку. При фокальній епілепсії локалізація розряду (наприклад, у скроневій зоні — T3, T4) дозволяє встановити вогнище ураження. При генералізованих формах патологічні сигнали реєструються симетрично в обох півкулях [3].

Також важливим є використання викликаних потенціалів — стимулювання зорової, слухової або сенсорної системи для провокації відповідей мозку, які можуть бути спотвореними у хворих на епілепсію [9].

Таким чином, нейрогарнітури можуть виконувати роль портативного EEG-моніторингу, що дозволяє [3]:

- виявити міжприступну активність у домашніх умовах;
- фіксувати провокаційні фактори (наприклад, при фотосенситивній епілепсії), ідентифікувати фокуси ураження для подальшого клінічного обстеження, контролювати ефективність лікування в динаміці.

Хоча діагноз "епілепсія" встановлюється лише лікарем-неврологом після клінічного й інструментального обстеження (відео-EEG, МРТ), нейрогарнітури є корисним інструментом для первинного виявлення патологічної активності, тривалого моніторингу, індивідуального прогнозу та телемедицини [3, 9].

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Діагностування шизофренії за допомогою нейрогарнітур [3] ґрунтується на аналізі електроенцефалографічної активності, що відображає порушення функціональної інтеграції мозку, асоційовані з когнітивними, емоційними та сенсорними розладами. Хоча шизофренія не має одного-єдиного EEG-патерну, дослідження показують наявність кількох характерних особливостей, які можуть бути виявлені нейрогарнітурами в поєднанні з відповідним програмним забезпеченням.

Найтиповішою особливістю EEG при шизофренії є зниження гамма-активності (30–100 Гц), яка відповідає за обробку складної інформації, сенсорну інтеграцію та формування свідомого досвіду. При цьому гамма-хвилі можуть бути знижені як у стані спокою, так і під час виконання когнітивних завдань, що свідчить про порушення нейронної синхронізації в корі головного мозку. Також часто спостерігається підвищення тета- (4–7 Гц) і дельта-активності (0,5–3 Гц) у фронтальних і скроневих ділянках, що вказує на уповільнення обробки інформації та дефіцит контролю уваги.

Ще одним ключовим маркером є зменшення когерентності між півкулями, особливо між лобовими та тім'яними зонами, що свідчить про порушення координації між різними мозковими центрами. У деяких пацієнтів також виявляють фронтальну десинхронізацію — зниження активності альфа-ритму (8–12 Гц) у лобових ділянках (F3, F4), яка корелює з негативними симптомами, такими як апатія, зниження мотивації та емоційна відчуженість. Нейрогарнітури, які підтримують багатоканальний запис EEG (наприклад, Neuroelectrics Enobio, OpenBCI, Emotiv EPOC X), дають змогу зафіксувати ці патерни під час виконання спеціальних тестів: когнітивних навантажень, задач на розпізнавання емоцій або реагування на звукові стимули. У цих умовах реєструються викликані потенціали, зокрема компоненти P300 або N100, які часто виявляються зниженої амплітуди або затримані у пацієнтів з шизофренією [3, 7]. Сучасне програмне забезпечення до нейрогарнітур застосовує алгоритми машинного навчання, які аналізують великі обсяги EEG-даних, шукають шаблони дизрегуляції мозкової активності та дозволяють будувати моделі диференційної діагностики. У дослідженнях на основі штучного інтелекту точність попереднього виявлення шизофренії за EEG-даними сягає 80–90%, особливо якщо аналізуються багатомірні індекси: спектральна потужність, когерентність, ентропія, варіабельність і нейронна складність.

Отже, нейрогарнітури не замінюють клінічного діагнозу, який має ставити психіатр на основі комплексної оцінки (анамнез, поведінка, психотичні симптоми), однак можуть бути корисними як інструмент для попереднього скринінгу, оцінки тяжкості когнітивного дефіциту, динамічного моніторингу лікування, а також дослідницької нейропсихіатрії. Їх застосування є перспективним у контексті персоналізованої медицини, телемоніторингу та розробки нових біомаркерів психічних розладів.

Діагностування депресії за допомогою нейрогарнітур [2, 3, 13] здійснюється на основі аналізу мозкової електричної активності, яка відображає функціональний стан кори головного мозку та особливості емоційної регуляції. Хоча депресія є клінічним діагнозом, що ґрунтується на симптомах і поведінці, нейрофізіологічні дані, зокрема EEG-патерни, дозволяють виявити об'єктивні біомаркери, які можуть бути зафіксовані за допомогою сучасних нейрогарнітур. Однією з найбільш відомих і стабільних особливостей є фронтальна альфа-асиметрія. У пацієнтів з депресією [2, 3] спостерігається зниження альфа-активності (8–12 Гц) у лівій лобовій ділянці мозку (електрод F3) порівняно з правою (F4), що свідчить про гіпоактивність лівої півкулі, відповідальної за позитивні емоції, мотивацію та соціальну ініціативу. Цей феномен відомий як індикатор пригніченого афекту. Водночас, у багатьох пацієнтів зростає бета-активність (13–30 Гц), особливо в центральних і лобових ділянках, що може свідчити про внутрішнє напруження, тривожність або румінації (нав'язливі думки) [2, 3].

Також в EEG при депресії спостерігаються підвищена тета-активність (4–7 Гц) у фронтальній корі та зниження когерентності між лобовими і тім'яними зонами, що може бути пов'язано з порушенням роботи виконавчих функцій, уваги та процесів прийняття рішень. При важких формах депресії з анедонією (втрата здатності відчувати задоволення) часто фіксується зниження варіативності EEG-сигналів, що вказує на загальну нейронну інертність [3]. Нейрогарнітури можуть використовуватись для неінвазивного запису EEG у домашніх або клінічних умовах. Пацієнту пропонується виконувати серію тестів (наприклад, слухові або візуальні стимули, когнітивні завдання), а система аналізує EEG-патерни в реальному часі. За допомогою програмного забезпечення обчислюється індекс депресивного спектру — за співвідношенням альфа/бета, ступенем фронтальної асиметрії та потужністю тета-активності. У багатьох системах також застосовуються алгоритми штучного інтелекту, які розпізнають патерни, пов'язані з афективними розладами, з точністю до 80–90% при використанні великих навчальних вибірок [2, 3]. Нейрогарнітури також використовуються у терапії депресії — зокрема для нейрофідбеку, коли пацієнт тренується "регулювати" власну мозкову активність у напрямку підвищення альфа-ритму або зниження асиметрії. Такі тренування можуть мати антидепресивний ефект, особливо при легких і середніх формах розладу.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Отже, хоча нейрогарнітури не замінюють клінічної діагностики депресії, вони забезпечують об'єктивний інструмент для скринінгу, нейрофізіологічного моніторингу, персоналізованого лікування та біологічного зворотного зв'язку. Їх застосування особливо доцільне у поєднанні з психотерапією, фармакотерапією та функціональною діагностикою.

Діагностування тривожних розладів за допомогою нейрогарнітур [4, 12, 13] базується на виявленні змін у електричній активності мозку, характерних для станів гіпервозбудження, підвищеної уваги до загроз і дисбалансу між зонами, що відповідають за контроль емоцій та раціональну оцінку. EEG (електроенцефалографія), яку зчитують нейрогарнітури, дозволяє об'єктивно фіксувати нейрофізіологічні ознаки тривоги навіть тоді, коли симптоми суб'єктивно слабо виражені або масковані.

Однією з ключових ознак тривожних розладів є підвищена бета-активність, особливо у високочастотному діапазоні (21–30 Гц), яка реєструється в лобових ділянках (F3, F4) та центральній корі. Цей ритм асоціюється з надмірним когнітивним контролем, тривожним очікуванням, гіперпильністю, румінаціями та складністю розслабитися. Високий рівень бета-ритму вказує на перезбудження симпатичної нервової системи та часто супроводжується соматичними симптомами — тахікардією, м'язовим напруженням, проблемами зі сном [4, 17, 18].

Ще однією характерною особливістю є зниження альфа-активності (8–12 Гц), особливо у стані спокою з закритими очима. У нормі альфа-хвилі вказують на стан розслаблення та внутрішньої стабільності. При тривожності їх потужність зменшується, а ритм стає нерегулярним, що свідчить про нездатність мозку перейти в режим відновлення. Часто виявляється порушення фронтальної асиметрії: наприклад, домінування альфа-активності у лівій півкулі (F3) над правою (F4) інтерпретується як схильність до уникнення, страху та пригнічення ініціативи. У пацієнтів із генералізованим тривожним розладом також спостерігається підвищена тета-активність (4–7 Гц) у фронтальних зонах, що пов'язано з розсіяною увагою, зниженим самоконтролем та внутрішнім перенапруженням. Крім того, знижується когерентність між фронтальними та тім'яними ділянками, що вказує на дезорганізацію роботи виконавчих функцій [4].

Нейрогарнітури [6], такі як Emotiv Epos X, Muse S, NeuroSky MindWave або Neuphony, здатні зчитувати ці сигнали в реальному часі та передавати їх на комп'ютер або смартфон. Програмне забезпечення проводить спектральний аналіз, вираховує індекси тривожності (наприклад, співвідношення бета/альфа), аналізує фронтальну асиметрію, когерентність і ритмічну стабільність. Сучасні алгоритми машинного навчання дозволяють системі автоматично ідентифікувати тривожні стани з точністю до 80–90% за накопиченою базою патернів. Такі методи застосовуються як для попереднього скринінгу, так і для біозворотного зв'язку, де пацієнт навчається впливати на свою мозкову активність і поступово знижувати бета-ритми, посилювати альфа та відновлювати саморегуляцію.

Таким чином, діагностика тривожних розладів за допомогою нейрогарнітур дозволяє об'єктивно оцінити ступінь нейрофізіологічної дезрегуляції, визначити тип тривоги (реактивна, генералізована, соматизована), відстежити динаміку стану в часі та підібрати персоналізовану терапію, яка враховує не лише поведінкові симптоми, а й біоелектричний стан мозку.

Нейрогарнітури активно використовують у нейрофідбек-терапії та зоровому нейротренуванні, особливо у випадках, коли порушення зору мають функціональний або нейропсихологічний характер. Це стосується таких станів, як амбліопія, порушення контролю зорової уваги, деякі види косоокості або втрата зорових функцій після інсульту чи черепно-мозкових травм. Наприклад, при амбліопії нейрогарнітура реєструє електричну активність мозку під час виконання спеціальних візуальних завдань. Пацієнту демонструються зображення, які стимулюють роботу слабшого ока, і якщо активність у потиличній ділянці мозку (де обробляється зоровий сигнал) відповідає правильній реакції, система надає позитивний зворотний зв'язок — це може бути візуальний, аудіальний або ігровий стимул. Така терапія сприяє формуванню нових нейронних зв'язків та покращенню зорового сприйняття. У дітей із синдромом дефіциту уваги або після травм часто виникає порушення візуального фокусування та слідування очима, що також коригується за допомогою нейрогарнітури: пацієнт тренується утримувати увагу на об'єктах, і коли система фіксує зниження активності у відповідних зонах мозку, вона сигналізує про необхідність зосередження. Таким чином розвивається зорово-моторна координація. У випадках косоокості або порушень бінокулярного зору використовують принцип зорового нейропереключення — тобто пацієнт виконує вправи, що стимулюють мозок інтегрувати зображення з обох очей. Усе це супроводжується моніторингом EEG і поступовою перебудовою зорової обробки. Також нейрогарнітури використовуються у станах стресу або психоемоційного перенапруження, коли зростає периферійний зір або знижується чіткість сприйняття через напруження центральної нервової системи. У таких випадках застосування нейрогарнітур, що спрямовані на релаксацію (наприклад Muse або Neuphony), сприяє зниженню тривожності, розширенню поля зору та покращенню зорової чутливості.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

Отже, нейрогарнітури не замінюють офтальмологічного лікування, але є ефективним інструментом у реабілітації, тренуванні зорової уваги та відновленні зору у випадках, де ключову роль відіграє мозкова обробка зорової інформації. Їх особливо доцільно застосовувати в поєднанні з офтальмотерапією, віртуальною реальністю та нейропсихологічним супроводом.

ВИСНОВКИ

Сучасні нейрогарнітури на основі ЕЕГ-технологій відкривають нові можливості для виявлення психоневрологічних порушень, таких як депресія, тривожні стани, епілепсія, хвороба Паркінсона, Альцгеймера та шизофренія. Вони дають змогу швидко, безболісно та економічно ефективно оцінити функціональний стан мозку без потреби у складному медичному обладнанні. Завдяки розвиненим алгоритмам аналізу біоелектричних сигналів можна точно виявляти нейрофізіологічні зміни, характерні для окремих розладів. Широке поширення бездротових пристроїв робить їх зручними для використання як у клінічному середовищі, так і вдома. Крім того, нейрогарнітури активно застосовуються в реабілітаційних програмах із нейрофідбеком для корекції психічного стану. Загалом, ці пристрої мають значний потенціал для інтеграції в персоналізовану медицину та телемоніторинг.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Thibault, R. T., Lifshitz, M., Birbaumer, N., & Raz, A. (2020). Neurofeedback, self-regulation, and brain imaging: Clinical science and fad in the service of mental disorders. *Psychotherapy and Psychosomatics*, 89(4), 193–207. <https://doi.org/10.1159/000506832>
2. Bekkedal, M. Y. V., Rossi, J. S., Panksepp, J., & Davis, M. (2021). EEG asymmetry in major depressive disorder: State, trait, or artifact? *Biological Psychology*, 162, 108093. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2021.108093>
3. Tavakoli, H., & Motiei-Langroudi, R. (2023). Clinical application of wearable EEG devices in neuropsychiatric disorders: A review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17, 1122334. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1122334>
4. Mehta, R., Bajaj, H., & Roy, D. (2022). Machine learning for mental health in neurophysiology: EEG-based classification of anxiety and depression. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 30, 980–991. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2022.3170198>
5. Krigolson, O. E. (2018). Event-related brain potentials and the study of decision making: A brief review. *Brain Sciences*, 8(8), 132. <https://doi.org/10.3390/brainsci8080132>
6. Casson, A. J. (2019). Wearable EEG and beyond. *Biomedical Engineering Letters*, 9, 53–71. <https://doi.org/10.1007/s13534-019-00096-2>
7. Abiri, R., Borhani, S., Sellers, E. W., Jiang, Y., & Zhao, X. (2019). A comprehensive review of EEG-based brain–computer interface paradigms. *Journal of Neural Engineering*, 16(1), 011001. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aaf12e>
8. Dauwels, J., Vialatte, F., & Cichocki, A. (2017). Diagnosis of Alzheimer's disease from EEG signals: Where are we standing? *Current Alzheimer Research*, 14(4), 394–408. <https://doi.org/10.2174/1567205013666161222143701>
9. An, D., Fahoum, F., & Gotman, J. (2017). Detection of focal epileptic seizures using scalp EEG and advanced signal processing. *Clinical Neurophysiology*, 128(6), 958–968. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.03.008>
10. Ibrahim, A., & Majid, M. A. (2020). Brain–computer interface for Parkinson's disease patients: A systematic review. *IEEE Access*, 8, 185146–185157. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029941/>
11. Niedermeyer, E., & da Silva, F. L. (Eds.). (2020). *Electroencephalography: Basic principles, clinical applications, and related fields* (7th ed.). Oxford University Press.
12. Шевчук, І.М., & Козловська, І.С. (2023). Перспективи застосування нейротехнологій у діагностиці психічних розладів. *Український журнал з проблем медицини та біології*, 28(4), 25–31.
13. Дяченко, В. Ю. (2022). Технології біологічного зворотного зв'язку на основі мозкової активності: діагностичні можливості. *Наукові вісті НТУУ «КПІ»*, 4, 47–52.
14. Лавренюк, О. П., & Резнік, С. В. (2021). Електроенцефалографія в практиці психологічної діагностики. *Психологія і суспільство*, 2, 119–125.
15. Майданюк, В. П., & Романюк, О. Н. (2025, 24–27 березня). *Неінвазивний нейроінтерфейс Користувач–Комп'ютер*. Матеріали ЛІІ Всеукраїнської науково-технічної конференції

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

- підрозділів Вінницького національного технічного університету (2024), м. Вінниця. <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2025/paper/view/23517/19471>
16. Grand View Research. (2024). *Wearable EEG headsets market to reach USD 244.9 million by 2030, growing at a CAGR of 10.4%* [Press release]. Retrieved from Grand View Research website.
 17. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
 18. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

REFERENCES

1. Thibault, R. T., Lifshitz, M., Birbaumer, N., & Raz, A. (2020). Neurofeedback, self-regulation, and brain imaging: Clinical science and fad in the service of mental disorders. *Psychotherapy and Psychosomatics*, 89(4), 193–207. <https://doi.org/10.1159/000506832>
2. Bekkedal, M. Y. V., Rossi, J. S., Panksepp, J., & Davis, M. (2021). EEG asymmetry in major depressive disorder: State, trait, or artifact? *Biological Psychology*, 162, 108093. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2021.108093>
3. Tavakoli, H., & Motiei-Langroudi, R. (2023). Clinical application of wearable EEG devices in neuropsychiatric disorders: A review. *Frontiers in Human Neuroscience*, 17, 1122334. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2023.1122334>
4. Mehta, R., Bajaj, H., & Roy, D. (2022). Machine learning for mental health in neurophysiology: EEG-based classification of anxiety and depression. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 30, 980–991. <https://doi.org/10.1109/TNSRE.2022.3170198>
5. Krigolson, O. E. (2018). Event-related brain potentials and the study of decision making: A brief review. *Brain Sciences*, 8(8), 132. <https://doi.org/10.3390/brainsci8080132>
6. Casson, A. J. (2019). Wearable EEG and beyond. *Biomedical Engineering Letters*, 9, 53–71. <https://doi.org/10.1007/s13534-019-00096-2>
7. Abiri, R., Borhani, S., Sellers, E. W., Jiang, Y., & Zhao, X. (2019). A comprehensive review of EEG-based brain-computer interface paradigms. *Journal of Neural Engineering*, 16(1), 011001. <https://doi.org/10.1088/1741-2552/aaf12e>
8. Dauwels, J., Vialatte, F., & Cichocki, A. (2017). Diagnosis of Alzheimer's disease from EEG signals: Where are we standing? *Current Alzheimer Research*, 14(4), 394–408. <https://doi.org/10.2174/1567205013666161222143701>
9. An, D., Fahoum, F., & Gotman, J. (2017). Detection of focal epileptic seizures using scalp EEG and advanced signal processing. *Clinical Neurophysiology*, 128(6), 958–968. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2017.03.008>
10. Ibrahim, A., & Majid, M. A. (2020). Brain-computer interface for Parkinson's disease patients: A systematic review. *IEEE Access*, 8, 185146–185157. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3029941>
11. Niedermeyer, E., & da Silva, F. L. (Eds.). (2020). *Electroencephalography: Basic principles, clinical applications, and related fields* (7th ed.). Oxford University Press.
12. Shevchuk, I. M., & Kozlovska, I. S. (2023). Prospects for the use of neurotechnologies in the diagnosis of mental disorders. *Ukrainian Journal on Problems of Medicine and Biology*, 28(4), 25–31.
13. Dyachenko, V. Yu. (2022). Biofeedback technologies based on brain activity: Diagnostic capabilities. *Scientific News of NTUU "KPI"*, 4, 47–52.
14. Lavreniuk, O. P., & Reznik, S. V. (2021). Electroencephalography in psychological diagnostics practice. *Psychology and Society*, 2, 119–125.
15. Maidaniuk, V. P., & Romaniuk, O. N. (2025, March 24–27). Non-invasive brain-computer user interface. In *Proceedings of the LIII All-Ukrainian Scientific and Technical Conference of the Departments of Vinnytsia National Technical University (2024)* (Vinnytsia, Ukraine). <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fitki/all-fitki-2025/paper/view/23517/19471>
16. Grand View Research. (2024). *Wearable EEG headsets market to reach USD 244.9 million by 2030, growing at a CAGR of 10.4%* [Press release]. <https://www.grandviewresearch.com/>
17. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
18. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

Надійшла до редакції 12.04.25 р.

СИСТЕМИ ТЕХНІЧНОГО ЗОРУ І ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ З ОБРОБКОЮ ТА РОЗПІЗНАВАННЯМ ЗОБРАЖЕНЬ

РОМАНЮК ОЛЕКСАНДР НИКИФОРОВИЧ – д.т.н., професор, завідувач кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, **e-mail: rom8591@gmail.com**

ПАВЛОВ ВОЛОДИМИР СЕРГІЙОВИЧ – Ph.D., молодший науковий співробітник кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, **e-mail: machinehead6926@gmail.com**

МАЙДАНИУК ВОЛОДИМИР ПАВЛОВИЧ – к.т.н., доцент кафедри програмного забезпечення, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, **e-mail: maidaniuk2000@gmail.com**

ТИТОВА НАТАЛІЯ ВОЛОДИМИРІВНА – д.т.н., професор, Національний університет «Одеська Політехніка», **e-mail: tnv.titova@gmail.com**

РОМАНЮК СЕРГІЙ ОЛЕКСАНДРОВИЧ - к.т.н., ст. викладач, Національний університет «Одеська Політехніка», **e-mail: webvntuua@gmail.com**

O.N. ROMANIUK, V.S. PAVLOV, N.V. TITOVA,
S.O. ROMANIUK, V.P. MAIDANYUK

USE OF NEUROHEADSETS FOR DIAGNOSTICS OF DISEASES

Vinnytsia National Technical University, Ukraine
National University “Odessa Polytechnika”, Ukraine

УДК 004.9

А. В. ЩЕРБАТЮК, С.Є. ТУЖАНСЬКИЙ

МЕТОД СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ ОКТ З ДОПОМОГОЮ ЗГОРТКОВОЇ НЕЙРОМЕРЕЖІ

Вінницький національний технічний університет 21021, Хмельницьке шосе 95, Вінниця, Україна

Анотація: У статті здійснено аналіз методів сегментації зображень оптичної когерентної томографії, створено модель згорткової нейромережі U-Net, здійснено обробку серії тестових зображень з відкритої бази даних та здійснено порівняння результатів обробки з іншими алгоритмами за індексом структурної схожості (SSIM). Також здійснено попередню обробку тестових зображень для підвищення якості сегментації. В даній роботі здійснено створення, тренування та застосування згорткової нейромережі U-Net. Розглянуто існуючі методи сегментації зображень оптичної когерентної томографії для діагностики та моніторингу офтальмологічних захворювань. Було проаналізовано переваги використання глибокої згорткової нейронної мережі U-Net у порівнянні з класичними методами, такими як оператор Собеля, та оператор Прюїтт. На відміну від класичних алгоритмів, які мають обмежену здатність адаптуватися до шуму, неоднорідності зображення та патологій, U-Net забезпечив вищу точність сегментації зображень.

Ключові слова: оптична когерентна томографія, згорткова нейромережа, U-Net, фільтр Гауса, індекс структурної схожості.

Abstract: The article analyzes the methods of segmentation of optical coherence tomography images, creates a convolutional neural network model U-Net, processes a series of test images from an open database, and compares the results of processing with other algorithms using the structural similarity index (SSIM). Pre-processing of test images to improve the quality of segmentation is also performed. Preprocessing of test images was also carried out to improve the quality of segmentation. In this work, the U-Net convolutional neural network was created, trained and applied. Existing methods of segmentation of optical coherence tomography images for the diagnosis and monitoring of ophthalmic diseases were considered. The advantages of using the U-Net deep convolutional neural network in comparison with classical methods, such as the Sobel operator and the Pruitt operator, were analyzed. Unlike classical algorithms, which have limited ability to adapt to noise, image heterogeneity and pathologies, U-Net provided higher accuracy of image segmentation.

Keywords: optical coherence tomography, convolutional neural network, U-Net, Gaussian filter, structural similarity index.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-178-184

ВСТУП

Сегментація зображень оптичної когерентної томографії (ОКТ) — це автоматизований або напівавтоматизований процес поділу знімків сітківки на анатомічні структури з метою кількісного та якісного аналізу. В офтальмології ця процедура є ключовою для діагностики та моніторингу захворювань, таких як глаукома, макулодистрофія чи діабетична ретинопатія. На відміну від суб'єктивної візуальної оцінки, алгоритми сегментації забезпечують точне вимірювання товщини шарів сітківки, виявляють мікрокістозні набряки або відшарування, що критично для раннього втручання. Автоматизація також дозволяє обробляти великі масиви даних для скринінгу популяцій, стандартизувати діагностичні критерії між клініками та зменшити час аналізу для лікарів. Крім того, сегментовані зображення слугують основою для створення 3D-моделей сітківки, інтеграції з системами штучного інтелекту та подальшого прогнозування ризиків ускладнень.

ОПТИЧНІ МОДЕЛІ ЛЮДСЬКОГО ОКА

Людське око, як складна багатокомпонентна оптична система, є об'єктом досліджень у офтальмології та біомедичній інженерії[1]. Створення точних оптичних моделей ока має ключове значення для розробки діагностичних приладів, планування хірургічних втручань та розуміння процесів, що відбуваються всередині ока. Сучасні моделі поділяються на схематичні (математичні) та фізичні (експериментальні).

Найвідоміші схематичні моделі, такі як модель Гульстранда або удосконалена версія Ле Гранда[2], базуються на спрощеному геометричному представленні ока. Вони включають сферичні або асферичні поверхні рогівки та кришталика, а також оптичні параметри (наприклад, показники заломлення). Хоча такі моделі ідеалізовані, їх простота дозволяє швидко розраховувати траєкторії променів[3], прогнозувати аберації (наприклад, сферичні) та використовувати їх для калібрування абераметрів. Сучасні підходи враховують також асферичність рогівки, товщину шарів сітківки та навіть хроматичні аберації, що робить їх більш реалістичними.

Фізичні моделі, такі як абератори, імітують оптичні властивості ока за допомогою лінз, дифракційних елементів або програмованих модуляторів світла. Вони використовуються для тестування офтальмологічного обладнання (наприклад, ОКТ-сканерів), відтворення патологій (астигматизм, катаракта) у лабораторних умовах, навчання нейромереж для автоматизованої діагностики, де синтетичні дані з моделей доповнюють реальні зображення ОКТ.

Оптичні моделі ока залишаються незамінним інструментом для науки та медицини. Їх подальший розвиток потребує інтеграції між дисциплінами: фізіологами, інженерами та фахівцями з машинного навчання[4]. Використання методів ОКТ, зокрема автоматизованої сегментації на основі U-Net, дозволяє закрити прогалини між теоретичними моделями та клінічною практикою.

СЕГМЕНТАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ ОКТ

Оптична когерентна томографія (ОКТ) — є сучасною технологією візуалізації, яка дозволяє отримувати різноманітну інформацію про внутрішні структури об'єкта, зокрема дані про будову біологічних тканин, кровообіг, пружні параметри, зміни поляризації та молекулярний склад. На відміну від розвитку самої технології ОКТ, яка активно досліджується з 1991 року, автоматизована сегментація ОКТ-зображень стала предметом інтенсивних досліджень лише в останнє десятиліття. Однак саме сегментація залишається найскладнішим та найважливішим етапом аналізу ОКТ-даних, оскільки не існує універсального методу, який би однаково ефективно працював для всіх типів завдань[5].

Однією з ключових проблем у сегментації ОКТ-зображень є розробка систем, придатних для клінічного застосування. Більшість алгоритмів тестуються на обмеженій кількості зображень із визначеними аномаліями (або навіть на зразках здорових тканин), що робить їх придатними для лабораторних умов, але не для клінічної практики[6]. Крім того, ОКТ-зображення мають високий рівень шуму, що змушує використовувати 3D-контекстуальну інформацію для підвищення точності. Також структура сітківки може суттєво змінюватися під впливом захворювань. Незважаючи на це, сегментація ОКТ-зображень залишається перспективним напрямком, і значні зусилля спрямовані на створення автоматизованих алгоритмів для аналізу сітківки.

КЛАСИЧНІ МЕТОДИ СЕГМЕНТАЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

Класичні методи сегментації зображень оптичної когерентної томографії (ОКТ) базуються на аналізі інтенсивності пікселів, геометричних особливостях структур сітківки та виявленні границь між її шарами. Одним із найпоширеніших підходів є використання градієнтних операторів для детекції країв, таких як оператори Собеля та Прюїтт [7].

Оператор Собеля застосовує двовимірні ядра згортки (наприклад, горизонтальне $[-1, 0, 1; -2, 0, 2; -1, 0, 1]$ та вертикальне $[-1, -2, -1; 0, 0, 0; 1, 2, 1]$), які підкреслюють перепади яскравості в зображенні, обчислюючи приблизну похідну по горизонталі та вертикалі. Це дозволяє виділяти межі шарів сітківки, наприклад, RNFL (сформованого нервовими волокнами) або RPE (пігментного епітелію), де різкі зміни інтенсивності пов'язані з анатомічними переходами. Оператор Прюїтт працює за схожим принципом, але використовує менш інтенсивні ядра (наприклад, $[-1, 0, 1; -1, 0, 1; -1, 0, 1]$), що робить його менш чутливим до шуму, але й менш точним у визначенні чітких країв. Обидва методи часто поєднуються з попереднім згладжуванням зображення (наприклад, фільтром Гауса) для пригнічення артефактів, властивих ОКТ-скануванню.

Інший підхід — порогова сегментація, де пікселі групуються за рівнем яскравості. Наприклад, Метод Отсу автоматично визначає оптимальний поріг для відділення темних ділянок зображення від світліших. Однак цей метод часто програє через неоднорідність освітлення в ОКТ-знімках та наявність патологій (набряків, крововиливів). Для більш складних випадків застосовували методи на основі області (region-based), такі як region growing, де сегментація починається з "зародкових" точок і розширюється, враховуючи схожість сусідніх пікселів. Незважаючи на простоту, такі алгоритми вимагали ручного вибору початкових точок і були чутливі до шуму. Активні контури (snakes) стали прогресивним кроком: вони "обтікають" структури, мінімізуючи енергію, що залежить від форми контуру та градієнта зображення. Це дозволяло точніше відтворювати криволінійні межі шарів, але вимагало ретельного підбору параметрів та часто "застрягало" в локальних мінімумах при наявності артефактів. Незважаючи на обмеження, класичні методи заклали основу для автоматизації обробки ОКТ, особливо в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Вони досі використовуються як допоміжні інструменти для попередньої обробки даних або в комбінації зі складнішими підходами, де швидкість обчислень має більший пріоритет, ніж точність обчислень.

ЗГОРТКОВІ НЕЙРОМЕРЕЖІ U-NET

U-Net — це згорткова нейронна мережа, що була розроблена для задач сегментації зображень. Архітектура U-Net має симетричну форму у вигляді літери "U": вона складається з кодера, що поступово зменшує розмір зображення та витягує ознаки, та декодера, який відновлює просторову роздільність і створює карту сегментації[8]. Архітектура нейромережі представлена на рис. 1

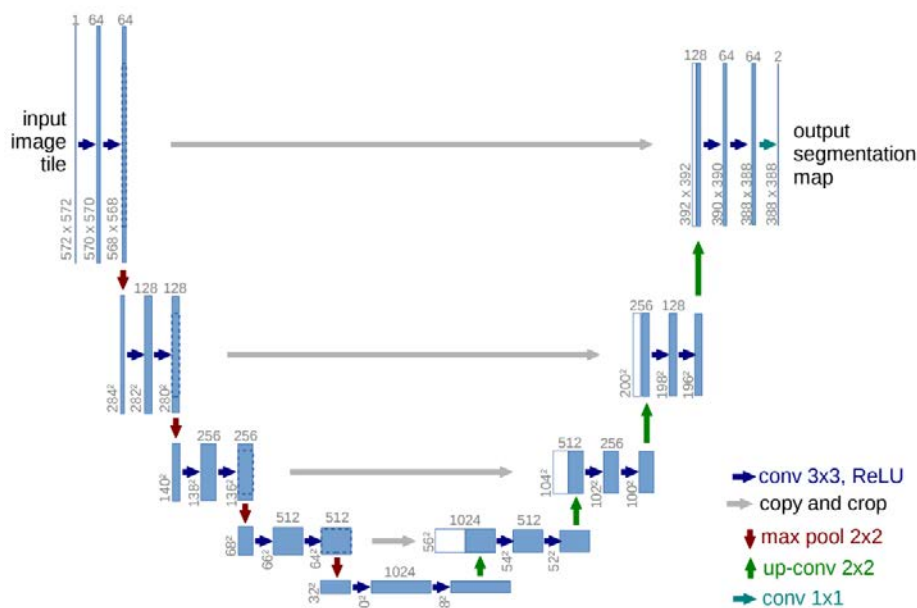


Рисунок 1 – Схема класичної моделі U-Net

Ключова перевага U-Net — це наявність з'єднань між відповідними шарами енкодера і декодера, що дозволяє передавати детальну інформацію про просторову структуру зображення[9]. Завдяки цьому U-Net забезпечує високу точність сегментації навіть на невеликих наборах даних і ефективно виділяє об'єкти з чіткими межами.

ОПИС ВИКОРИСТАНОЇ МОДЕЛІ U-NET

Програмна реалізація здійснена у ПЗ Spyder IDE. Також використано відкриту програмну бібліотеку Tensorflow версії 2.4.1 та відкриту програмну бібліотеку Keras версії 2.4.0 для роботи з штучною нейромережею[10]. Здійснено програмну реалізацію моделі U-Net, яка є згортковою нейронною мережею, спеціально адаптованою для задач сегментації зображень, зокрема для бінарної маски. Вона має класичну U-подібну архітектуру (рис.2), що складається з енкодера (шлях стиснення), декодера (шлях розгортання) та з'єднувальних містків (skip-connections), які зберігають просторову інформацію на всіх рівнях.

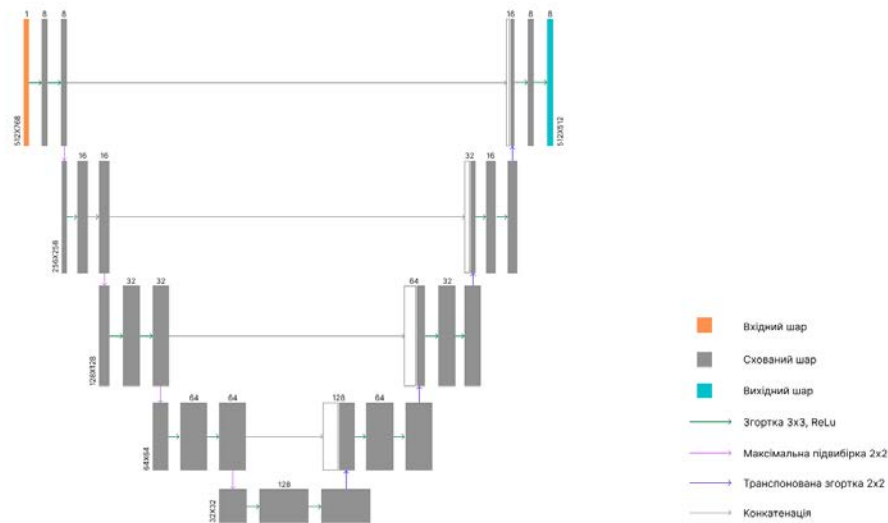


Рисунок 2 – Схема використаної моделі U-Net

На вхід подається зображення розміром 512×768 пікселів та з глибиною кольору 8 біт. Енкодер містить три рівні: перший рівень складається з двох згорткових шарів із 16 фільтрами, другий — із 32, третій — із 64, після кожної пари йде підвибірка через MaxPooling2D , що зменшує просторові розміри у два рази. У нижній частині мережі знаходиться найглибший блок з 64 фільтрами, після чого починається декодер з двома рівнями розгортання. Декодер використовує транспоновані згортки (Conv2DTranspose) для збільшення розміру зображення, а також об'єднує (concatenate) відповідні шари з енкодера для збереження деталей. Вихідний шар — це згортка 1×1 з функцією активації sigmoid, яка повертає маску з пікселями у діапазоні $[0, 1]$. Загалом модель складається з 13 згорткових шарів (враховуючи і звичайні, і транспоновані), має приблизно 1.2 мільйона параметрів і тренується з функцією втрат $\text{binary_crossentropy}$ та оптимізатором Adam.

Для обробки було використано зображення з відкритої бази ОКТ-зображень[11]. На етапі попередньої обробки було здійснено приведення зображень до 512×768 пкс. Результат обробки тестового зображення представлений на рис.3.

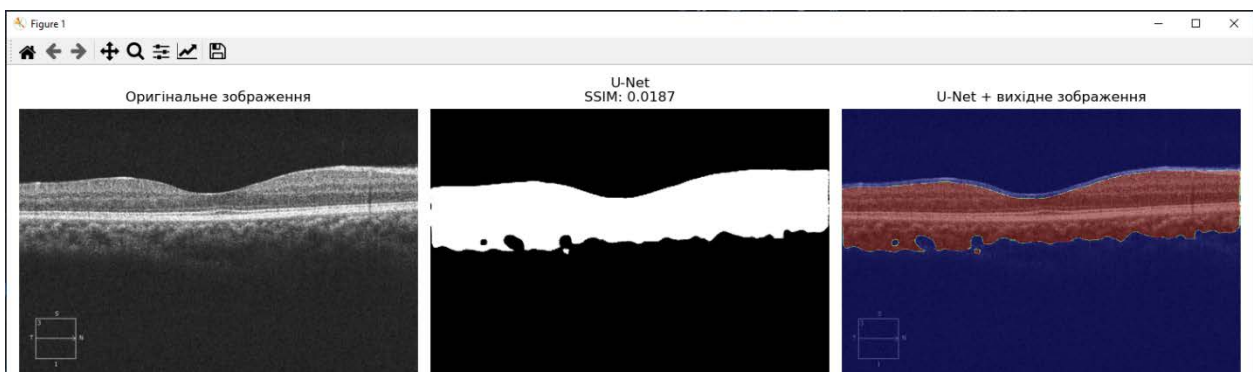


Рисунок 3 – Результат обробки тестового зображення

Оцінка результатів обробки здійснена шляхом обчислення індексу структурної схожості (SSIM) з використанням бібліотеки SSIM-PIL 1.0.14 [12]. Здійснено порівняння результатів обробки з результатами обробки з допомогою оператора Собеля та оператора Прюїтт, що детально розглядалися в роботі [7]. Порівняння результатів обробки зображень представлені на рис.4

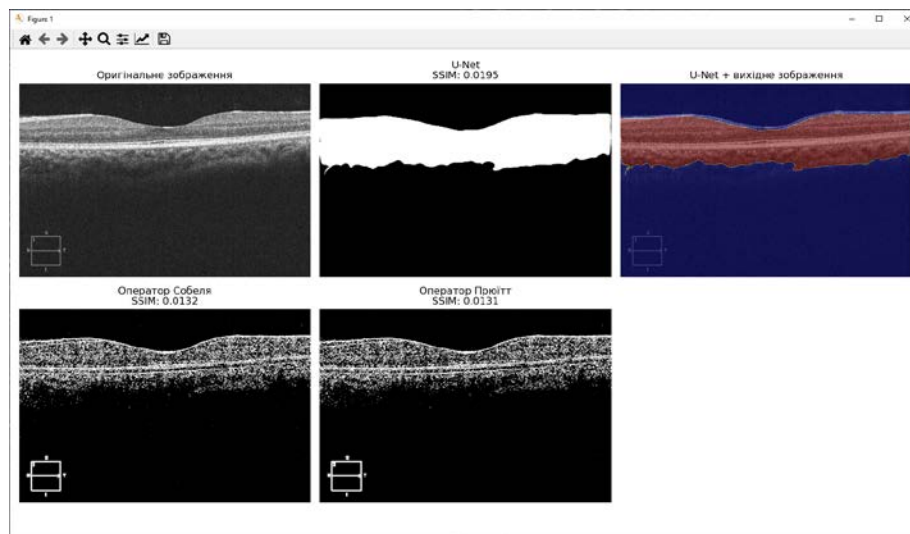


Рисунок 4 – Порівняння результатів обробки зображення

Здійснено тестову обробку та порівняння на вибірці з 50 тестових зображень з бази[11] та отримано наступний результат – в середньому індекс структурної схожості зображень, оброблених з допомогою даної моделі на 44% вищий, ніж індекс структурної схожості зображень, оброблених з допомогою оператора Собеля та оператора Прюїтт.

Також здійснено порівняння результату обробки вихідного зображення з допомогою даної моделі та обробку вихідного зображення, що було попередньо оброблене з допомогою фільтра Гауса для зниження рівня шуму на зображенні. Порівняння результатів обробки зображення з фільтрацією та без представлено на рис.5

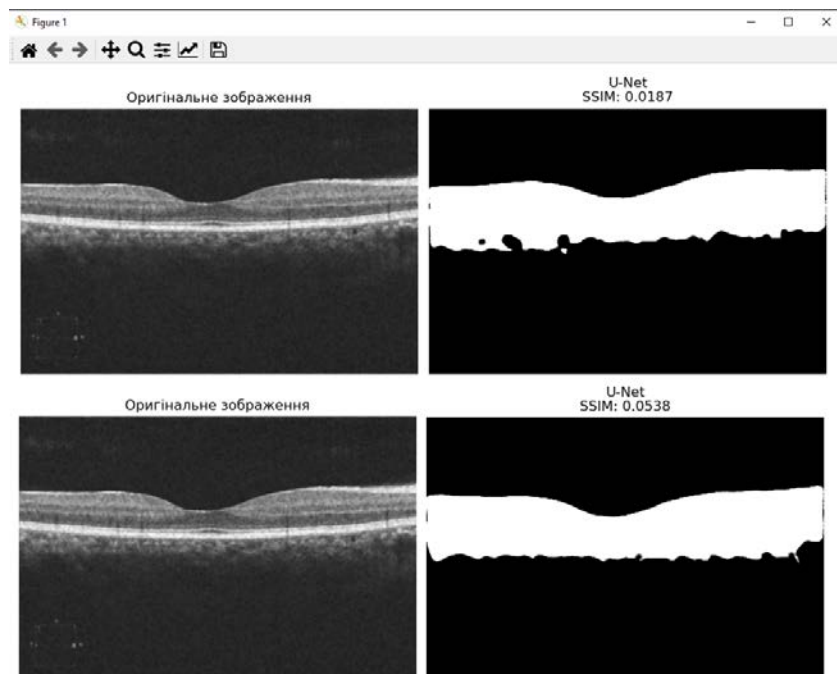


Рисунок 5 – порівняння результатів обробки зображення з попередньою фільтрацією

У верхній частині рисунку зображений результат обробки вихідного зображення, а у нижній – результат обробки вихідного зображення, що було оброблене з допомогою фільтра Гауса. В результаті завдяки обробці з допомогою фільтра Гауса[13]. індекс структурної схожості зображень виріс в середньому на 4.5% (на вибірці з 50 зображень).

ВИСНОВКИ

В даній роботі здійснено створення, тренування та застосування згорткової нейромережі U-Net. Розглянуто існуючі методи сегментації зображень оптичної когерентної томографії для діагностики та моніторингу офтальмологічних захворювань. Було проаналізовано переваги використання глибокої згорткової нейронної мережі U-Net у порівнянні з класичними методами, такими як оператор Собеля, та оператор Прюїтт. На відміну від класичних алгоритмів, які мають обмежену здатність адаптуватися до шуму, неоднорідності зображення та патологій, U-Net забезпечив вищу точність сегментації зображень. Особливо цінною є здатність архітектури зберігати просторову інформацію завдяки механізму пропуску (skip-connections), що дозволило досягти вищого індексу структурної схожості (SSIM) на всіх тестових зображеннях. Модель, реалізована у цій роботі, показала в середньому на 44% вищий індекс структурної схожості (SSIM) порівняно з класичними підходами, що підтверджує її перевагу у задачах медичної візуалізації. Універсальність даної моделі дозволяє легко адаптувати її до нових наборів даних. Водночас, застосування U-Net має і певні обмеження, зокрема потреба у великій кількості анотованих даних для навчання, відносно високе споживання ресурсів під час тренування та складність інтерпретації внутрішніх параметрів моделі. Також здійснено попередню обробку тестових зображень, що дозволило в середньому на 4.5% підвищити якість сегментації зображень. Такий підхід відкриває можливості для інтеграції з існуючими системами обробки зображень оптичної когерентної томографії.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Фізичні основи біомедичної оптики : монографія / [Павлов С. В., Кожем'яко В. П., Колісник П. Ф. та ін.] – Вінниця : ВНТУ, 2010. – 155 с.
2. Cui, C. & Lakshminarayanan, Vasudevan. (2003). The reference axis in corneal refractive surgeries: Visual axis or the line of sight?. Journal of Modern Optics - J MOD OPTIC. 50. 1743-1749. 10.1080/0950034031000070053.
3. Адаптивна оптика : навчальний посібник / [Васюра А. С., Павлов С. В., Прокопова М. О. та ін.] – Вінниця : ВНТУ, 2015. – 281 с. ISBN 978-966-641-638-7
4. Щербатюк А. В., Тужанський С. Є. Аналіз оптичних моделей людського ока. Матеріали Всеукраїнської науково-практичної інтернет-конференції «Молодь в науці: дослідження, проблеми, перспективи (МН-2024)», Вінниця, 11-20 травня 2024 р. Електрон. текст. дані. 2024. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2024/paper/viewFile/21550>
5. Павлов С. В., Поплавський А. А., Поплавская А. А., Бабюк Н. П.. Метод автоматического определения сегментационного порога для повышения качества прогнозирования параметров изображений. Метод автоматического определения сегментационного порога для повышения качества прогнозирования параметров изображений / С. В. Павлов, А. А. Поплавський, А. А. Поплавская, Н. П. Бабюк // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. - 2013. - № 2. - С. 8-12.
6. Павлов С. В., Салдан Й. Р., Злепко С. М., Азаров О. Д., Тимченко Л. І., Абраменко Л. В. Методи попередньої обробки томографічних зображень очного дна. Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. 2019. № 2. С. 4-12.
7. Щербатюк А. В., Тужанський С. Є. Методи виділення контурів на зображеннях ОКТ. Матеріали LIV Всеукраїнської науково-технічної конференції факультету інформаційних електронних систем. 2025 URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzip/all-frtzip-2025/paper/view/24051/20059>
8. Ясенко Л. С. Властивості згорткової нейронної мережі на основі автокодера / Л. С. Ясенко, Я. М. Клятченко // Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія. – 2021. – № 3. – С. 77-85. URI: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/36494>
9. Kugelman, J., Allman, J., Read, S.A. et al. A comparison of deep learning U-Net architectures for posterior segment OCT retinal layer segmentation. Sci Rep 12, 14888 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18646-2>
10. Оптика класифікації зображень для перенесення навчання у згорткових нейронних мережах [Текст] / М. С. Мамута, І. В. Кравченко, О. Д. Мамута, С. Є. Тужанський // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. – 2023. – № 1 (45). – С. 64-70. URI: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/37992>
11. Kermany, Daniel; Zhang, Kang; Goldbaum, Michael (2018), "Large Dataset of Labeled Optical Coherence Tomography (OCT) and Chest X-Ray Images", Mendeley Data, V3, doi: 10.17632/rschjbr9sj.3
12. SSIM-PIL Python Lib <https://github.com/ChsHub/SSIM-PIL>

13. Щербатюк А. В., Тужанський С. Є. Методи оптичної когерентної томографії та алгоритми фільтрації зображень для офтальмологічної діагностики. Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2024. № 1. С. 148-154. URL: <http://jnas.nbuu.gov.ua/article/UJRN-0001494647>

REFERENCES

1. Physical foundations of biomedical optics: monograph / [Pavlov S. V., Kozhem'yako V. P., Kolisnyk P. F. et al.] – Vinnytsia: VNTU, 2010. – 155 p.
2. Cui, C. & Lakshminarayanan, Vasudevan. (2003). The reference axis in corneal refractive surgeries: Visual axis or the line of sight?. Journal of Modern Optics - J MOD OPTIC. 50. 1743-1749. 10.1080/0950034031000070053.
3. Adaptive optics: textbook / [Vasyura A. S., Pavlov S. V., Prokopova M. O. et al.] – Vinnytsia: VNTU, 2015. – 281 p. ISBN 978-966-641-638-7
4. Shcherbatyuk A. V., Tuzhanskyi S. Ye. Analysis of optical models of the human eye. Materials of the All-Ukrainian scientific and practical Internet conference "Youth in science: research, problems, prospects (MN-2024)", Vinnytsia, May 11-20, 2024. Electronic. text. data. 2024. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/mn/mn2024/paper/viewFile/21550>
5. Pavlov S. V., Poplavskyi A. A., Poplavskaya A. A., Babiuk N. P.. Method of automatic determination of segmentation threshold for improving the quality of image parameter prediction. Method of automatic determination of segmentation threshold for improving the quality of image parameter prediction / S. V. Pavlov, A. A. Poplavskyi, A. A. Poplavskaya, N. P. Babiuk // Optical-electronic information and energy technologies. - 2013. - No. 2. - P. 8-12.
6. Pavlov S. V., Saldan Y. R., Zlepko S. M., Azarov O. D., Tymchenko L. I., Abramenko L. V. Methods of preprocessing tomographic images of the fundus. Information technologies and computer engineering, 2019. No. 2. P. 4-12.
7. Shcherbatyuk A. V., Tuzhansky S. Ye. Methods of contour selection on OCT images. Materials of the LIV All-Ukrainian scientific and technical conference of the faculty of information electronic systems. 2025 URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-frtzip/all-frtzip-2025/paper/view/24051/20059>
8. Yashenko L. S. Properties of a convolutional neural network based on an autoencoder / L. S. Yashenko, Ya. M. Klyatchenko // Information Technologies and Computer Engineering. – 2021. – No. 3. – P. 77-85. URI: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/36494>
9. Kugelman, J., Allman, J., Read, S.A. et al. A comparison of deep learning U-Net architectures for posterior segment OCT retinal layer segmentation. Sci Rep 12, 14888 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-18646-2>
10. Image classification assessment for transfer learning in convolutional neural networks [Text] / M. S. Mamuta, I. V. Kravchenko, O. D. Mamuta, S. E. Tuzhansky // Optical-electronic information and energy technologies. – 2023. – No. 1 (45). – P. 64-70. URI: <http://ir.lib.vntu.edu.ua/handle/123456789/37992>
11. Kermany, Daniel; Zhang, Kang; Goldbaum, Michael (2018), "Large Dataset of Labeled Optical Coherence Tomography (OCT) and Chest X-Ray Images", Mendeley Data, V3, doi: 10.17632/rschjbr9sj.3
12. SSIM-PIL Python Lib <https://github.com/ChsHub/SSIM-PIL>
13. Shcherbatyuk A. V., Tuzhansky S. Ye. Optical coherence tomography methods and image filtering algorithms for ophthalmological diagnostics. Optical-electronic information and energy technologies. 2024. No. 1. P. 148-154. URL: <http://jnas.nbuu.gov.ua/article/UJRN-0001494647>

Надійшла до редакції 20.02.25 р.

ЩЕРБАТЮК АРТЕМ ВОЛОДИМИРОВИЧ - аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: scherbatyuk.art@gmail.com**

ТУЖАНСЬКИЙ СТАНІСЛАВ ЄВГЕНОВИЧ – к.т.н, доцент кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: slavat@vntu.edu.ua**

ARTEM SHCHERBATYUK, STANISLAV TUZHANSKYI

METHOD OF SEGMENTATION OF OCT IMAGES USING A CONVULSIVE NEURAL NETWORK

Vinnytsia National Technical University

УДК 681.7: 616-71

В.В. ШОЛОТА

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В СИСТЕМАХ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ ІНТРОСКОПІЇ БІОЛОГІЧНИХ ТКАНИН ТА РІДИН

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
E-mail: lada.sholota@vntu.edu.ua*

Анотація. В статті розглянуто особливості застосування методів підтримки прийняття рішень на основі машинного навчання, нечіткої логіки та нейронних мереж в системах поляризаційної інтроскопії біологічних об'єктів. Наводиться порівняльний аналіз їх характеристик точності з урахуванням вхідних даних, програмної реалізації та типу діагностованих в системі інтроскопії патологій. Було визначено, що такі методи, як нечітка логіка, деякі методи машинного навчання (дерева рішень, XGBoost) та нейронні мережі (багатошаровий перцептрон) дозволяють досягти підвищення точності поляризаційної діагностики БШ до рівня 81-98%. Проте отримані результати точності можуть бути завищеними через недосконалість моделей оцінювання та способи формування вибірок, що потребує подальшого дослідження.

Ключові слова: метод підтримки прийняття рішень, машинне навчання, нейронні мережі, нечітка логіка, біологічний шар, система, поляризаційна інтроскопія.

Abstract. The article discusses the features of the application of decision support methods based on machine learning, fuzzy logic and neural networks in polarization introscopy systems of biological objects. It was determined that methods such as fuzzy logic, some machine learning methods (decision trees, XGBoost) and neural networks (multilayer perceptron) allow to achieve an increase in the accuracy of polarization diagnostics of BS to the level of 81-98%. However, the obtained accuracy results may be overestimated due to the imperfection of the evaluation models and methods of sample formation, which requires further research. A comparative analysis of their accuracy characteristics is presented, taking into account the input data, software implementation and the type of pathologies diagnosed in the introscopy system.

Key words: decision support method, machine learning, neural networks, fuzzy logic, biological layer, system, polarization introscopy.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-185-192

ВСТУП

Однією з сучасних тенденцій у медицині є використання інтроскопії як неруйнівного методу дослідження для встановлення діагнозу пацієнта. Важливої ролі набуває задача підвищення достовірності таких досліджень біологічних тканин (БТ) та біологічних рідин (БР) людини для виявлення різноманітних патологій, зокрема, новоутворень у внутрішніх органах людини.

Поляризаційна інтроскопія БТ та БР є сучасним методом діагностики, що дозволяє одержати набори поляризаційних зображень як внутрішніх органів людини, так і гістологічних зрізів біологічних тканин [1-4]. Проте здійснення візуального аналізу отриманих даних з біологічних шарів (БШ) може бути недостатньо для подальшого формування експертної (лікарської) оцінки та постановки діагнозу. Таким чином, існує потреба в подальшому автоматизованому аналізі отриманих зображень та використанні сучасних інтелектуальних методів підтримки прийняття рішень (ППР) для збільшення кількості та якості інформації, на основі якої лікар встановлює діагноз. Вдала імплементація ППР у системи поляризаційної інтроскопії БТ і БР сприятиме підвищенню достовірності діагностики.

Важливу роль у виділенні інформації зі зразку БШ відіграють як методи поляриметричної візуалізації розподілів об'єктних параметрів БШ (матриці Мюллера [3-6], матриці Джонса [7-9], орієнтаційні [5, 10] та фазові [5, 11] мапи БШ), так і методи отримання їх інформативних ознак (статистичних, кореляційних, фрактальних) [4, 5], які використовують як вхідні дані для обраного методу ППР. Часто візуальне сприйняття мікроскопічного поляризаційного зображення БТ (БР) є недостатнім для виявлення патологій, тоді як, дослідження його кореляційних та фрактальних характеристик дає можливість здійснювати діагностику новоутворень на ранніх стадіях [5, 11, 12]. Так як різні види методів ППР (статистичні, нейромережеві, на основі нечіткої логіки) [13-15] можуть обробляти різні структури подання інформації, це є вагомим фактором для їх обрання та імплементації в діагностичних системах.

Для подальшого розвитку методів і підсистем ППР в системах поляризаційної інтроскопії БШ необхідно враховувати особливості високочутливих поляризаційних методів отримання інформації про структурну неоднорідність БШ в поєднанні з можливостями інформаційних технологій для її оброблення, аналізу та рекомендаційних діагностичних рішень. Це сприятиме підвищенню достовірності діагностики захворювань.

Таким чином, актуальним є вивчення ефективності задіяння широкого спектру методів ППР до діагностичних систем на основі поляризаційної інтроскопії та варіантів їх реалізації.

Метою роботи є аналіз відомих результатів застосування методів ППР в системах поляризаційної інтроскопії БТ та БР і визначення перспектив подальших досліджень.

ОСНОВНІ ПІДХОДИ ДО СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Вагоме місце серед сучасних медико-технологічних інформаційних систем займають біомедичні інформаційні системи, здатні здійснювати автоматичний синтез рекомендованого рішення. На сучасному рівні розвитку інформаційних технологій (ІТ) та штучного інтелекту (ШІ) остаточне рішення приймається лікарем як експертом в предметній області. Проте підсистеми ППР не лише є опорою для лікаря при діагностиці, а й за рахунок застосування різноманітних алгоритмів можуть виділяти та обробляти ознаки, непомітні для людського ока (навіть з апаратним підсиленням за допомогою мікроскопії), таким чином підвищуючи ймовірність виявлення патології у пацієнта.

Будь-який метод ППР, що використовується в подібних підсистемах, повинен бути попередньо навченим або адаптованим до предметної області. Для виведення математичної моделі ППР в інтроскопічних діагностичних системах використовуються як теоретичні знання про об'єкт дослідження, так і набори даних, зокрема, підготовлені лікарем нативні зразки БШ, в тому числі попередньо промарковані експертами на основі проведених медичних досліджень. Наявність таких наборів дозволяє вивести математичні правила або здійснити навчання моделей перед їх застосуванням в підсистемі ППР.

Суттєвою проблемою у медичній галузі є невелика кількість елементів вибірок, на основі яких здійснюється дослідження [16]. Це спричинено обмеженнями медичної етики, складністю отримання та обробки зразків, необхідністю наявності верифікованого лікарського діагнозу, тощо. Попри це, існує багато методів ППР, які можна використовувати у системах поляризаційної інтроскопії.

Враховуючи існуючі обмеження, особливості фізичного об'єкту і сучасні тенденції в сфері машинного навчання (МН), ІТ та ШІ, варто зосередити увагу на таких методах: нечіткі множини (в тому числі застосування нечіткої логіки), дерева рішень, штучні нейронні мережі (ШНМ) та інші алгоритми машинного навчання (метод опорних векторів, логістична регресія, рандомні ліси, градієнтне спускання, тощо) [13-17].

МН – це галузь досліджень ШІ, яка застосовується, зокрема, для оптимізації відомих математичних моделей в процесі навчання. Одним з варіантів використання є так зване кероване навчання, що включає в себе активне навчання, класифікування та регресію. Таким чином, алгоритми МН можуть бути застосованими до маркованих вхідних даних, в тому числі і для наборів поляризаційних зображень та/або виведених на їх основі за допомогою математичних розрахунків ознак.

До популярних алгоритмів МН, що здійснюють класифікацію на основі ознак, можна віднести XGBoost, SVM, LDA, Logistic regression, тощо. Їх перевагою у застосуванні як ППР для поляризаційної інтроскопії є можливість навчатись на відносно невеликих наборах даних. Окрім того, вони вимагають в середньому менше обчислювальних ресурсів, аніж ШНМ.

Дерева рішень також можуть будуватися на основі машинного навчання. Вони являють собою сукупність знань про досліджуваний об'єкт, представлених з допомогою гілок та вузлів. Фінальне рішення ухвалюється у «листку» – вузлу дерева, від якого не йде жодна інша гілка. Окрім переваг, перелічених для описаних вище алгоритмів МН, дерева рішень є більш легко інтерпретованими людиною, що може виділяти їх як більш зручний метод ППР у системах поляризаційної інтроскопії.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

ШНМ – обчислювальні системи, що з певною мірою подібності відтворюють функціонування людського мозку. Їх навчання також може здійснюватися за допомогою принципів МН. Існує багато видів ШНМ, зокрема: згорткові, спайкінгові, генеративні мережі, багатошаровий перцептрон, тощо. Не всі нейронні мережі можуть слугувати методом ППР.

Враховуючи особливості вхідних даних у поляризаційній інтроскопії, варто зосередити увагу на двох видах нейронних мереж: згорткових ШНМ та багатошаровому перцептрону.

Згорткові нейронні мережі (ЗНМ) – клас ШНМ, максимально адаптований до аналізу зображень, що дозволяє застосовувати їх безпосередньо до мюллер-матричних або джонс-матричних зображень, отриманих в системах поляризаційної інтроскопії для подальшої класифікації. Головною перешкодою для використання ЗНМ є потреба у великому об'ємі даних навчальної вибірки. Існують підходи, що дозволяють збільшити кількість даних, зокрема, при огляді так званих «зон інтересу» (наприклад, отриманні кількох БШ від різних ділянок досліджуваної БТ), а також при аналізі не повного зображення, а окремих груп пікселів, проте вони теж мають свої недоліки, зокрема, у малій репрезентативності вибірки.

Багатошаровий перцептрон – так звана «класична» нейронна мережа, що містить взаємопов'язані шари простих нейронів. Така ШНМ може застосовуватись не безпосередньо до зображення, а до наборів ознак, отриманих з них. Актуальною залишається потреба у великих навчальних вибірках.

В основі математичного апарату теорії нечітких множин лежить поняття ступені належності елемента до множини, що визначається за допомогою спеціальної функції. Функції належності апроксимуються з допомогою тригонометричних, кусково-лінійних, трикутних, сигмоїдальних залежностей, тощо. Як і більшість перерахованих вище моделей ППР, нечітка логіка працює з ознаками, а не безпосередньо з зображеннями. Перевагою застосування методів нечіткої логіки є можливість виведення правил на відносно невеликих вибірках даних та уникнення вимоги строгої відповідності ознак визначеним межах, так як дані описуються за допомогою нечітких термів. Недоліком є висока залежність алгоритму від функцій нечітких термів, що повинні надаватися або узгоджуватися з експертами.

Таким чином, існує велика кількість методів ППР, придатних для застосування у системах поляризаційної інтроскопії. Інформативність усіх перелічених моделей залежить не лише від особливостей їх реалізації та математичного апарату, а й від підготовки та особливостей організації даних, що надаються на вхід системи ППР.

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ТА ЇХ ПРОГРАМНИХ РЕАЛІЗАЦІЙ В СИСТЕМАХ ПОЛЯРИЗАЦІЙНОЇ ІНТРОСКОПІЇ БШ

Класична автоматизована система поляризаційної інтроскопії БШ [5], наведена на рисунку 1, складається, як правило, із джерела частково поляризаційного світла 1, поляризаційної оптики (модуля 3 генерації поляризації та модуля 8 аналізу поляризації), двопроменезаломлювального БШ 6, об'єктиву 7, камери 9 роздільної здатності ($M \times N$) для фіксації інтенсивностей поля, трансформованого зразком, комп'ютера 10 та мікроконтролерного модуля 11. Лінійні поляризатори $4_1 - 4_3$ та фазові $\lambda/4$ -пластинки $5_1 - 5_2$ з можливостями обертальних рухів та горизонтальних переміщень застосовують для реалізації модулів 3 та 8, функції керування якими покладено на модуль 11 через крокові двигуни $12_1 - 12_4$ та серводвигуни $13_1 - 13_2$.

Базуючись на формалізмі Стокс-Мюллера [5], в наведеній системі для кожного досліджуваного БШ можна визначити два класи характеристик його двопроменезаломлюючої структури. По-перше, визначити поляризаційні характеристики самого об'єкта (двовимірні розподіли повного або часткового набору елементів матриць Мюллера, розподіли амплітудних та фазових значень елементів матриці Джонса, орієнтаційні мапи, фазові мапи), а по-друге, визначити поляризаційні характеристики поля трансформованого випромінювання (азимутальні мапи та мапи еліптичностей, мапи фазових зсувів). З детальними алгоритмами їх формування можна ознайомитись в роботах [4, 5, 10, 11].

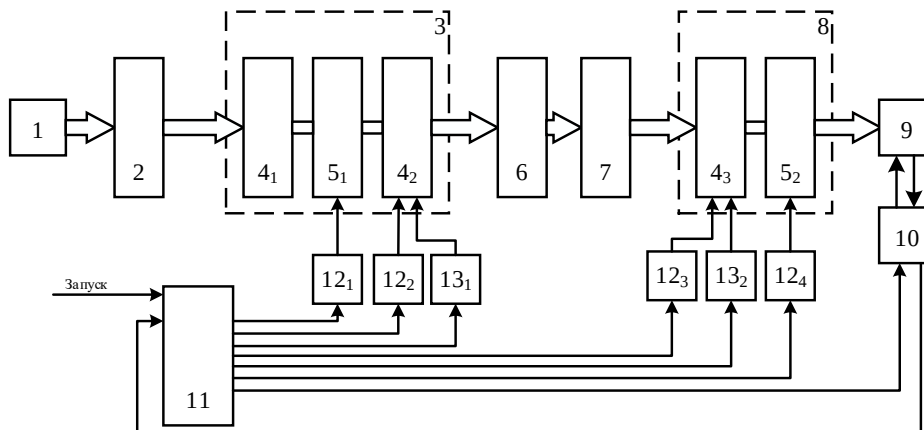


Рисунок 1 – Схема автоматизованої системи поляризаційної інтроскопії БШ

Структура елементів матриці Мюллера $Z(4 \times 4)$ для кожної точки перерізу двопротенезаломлюючого зразка БШ має вигляд [4, 5]:

$$Z(4 \times 4) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & z_{22} & z_{23} & z_{24} \\ 0 & z_{32} & z_{33} & z_{34} \\ 0 & z_{42} & z_{43} & z_{44} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Проте для систем інтроскопії із застосуванням матриці фоточутливих приймачів у вигляді цифрової камери роздільної здатності $(M \times N)$ часто вимірюють та аналізують двовимірні розподіли елементів матриці Мюллера або мюллер-матричні зображення (ММЗ) для перерізу БШ [5].

Вимірюючи матрицю Джонса у вигляді значень її комплексних елементів J_{ij} ($i = 1:2; j = 1:2$) із амплітудами $R_{ij}(x, y)$ та фазами $\theta_{ij}(x, y)$, подану у вигляді

$$J = \begin{bmatrix} J_{11}(x, y) = R_{11}(x, y)e^{i\theta_{11}(x, y)} & J_{12}(x, y) = R_{12}(x, y)e^{i\theta_{12}(x, y)} \\ J_{21}(x, y) = R_{21}(x, y)e^{i\theta_{21}(x, y)} & J_{22}(x, y) = R_{22}(x, y)e^{i\theta_{22}(x, y)} \end{bmatrix}, \quad (2)$$

також отримують інформацію про орієнтаційно-фазову структуру досліджуваного БШ.

Розглянемо порівняльні характеристики існуючих варіантів реалізацій методів та підсистем ППР у системах поляризаційної інтроскопії (таблиця 1).

У [17] було розглянуто виявлення ракового ураження ділянок шийки матки на основі ММЗ за допомогою машинного навчання. Характерною особливістю роботи є те, що в підсистемі ППР здійснюється оцінювання не цілої ділянки або зразка БШ, а окремих пікселів зображення.

В якості вибірки, на основі якої здійснювалось машинне навчання, використовували 23 зразки шийки матки, збережених у формаліні. Кожен зі зразків було попередньо верифіковано за методом гістопатологічного дослідження. На зображеннях з роздільною здатністю 600×800 пікселів, отриманих на трьох довжинах хвиль (450, 550 та 600 нм), було визначено зони ураження раком 3-ї стадії та здорові зони. З них було виділено групи пікселів, які в подальшому вносились до датасету, промарковані як норма або патологія (рак 3-ї стадії). Зони, визначені як ті, що мають 1-шу та 2-гу стадію, відкидалися. В якості ознак автори статті використали 16 параметрів матриці Мюллера для кожного пікселя.

Для машинного навчання було використано три методи ППР: дерева рішень, багатощаровий перцептрон та згорткову нейронну мережу. Варто відзначити особливість використання ЗНМ: класично цей тип ШНМ аналізує цілісне зображення доволі великої розмірності, але в даному випадку ЗНМ застосовується для матриці Мюллера кожного пікселя (всього 16 елементів). Авторами було використано

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

одношарову ЗНМ з простою структурою. Загальний об'єм вибірки становив 57 925 зразків пікселів з раком 3-ї стадії та 133 910 пікселів стану «норма».

На етапі оцінювання точності моделі ППР у статті [17] було зазначено, що стандартна оцінка асигуру на тренувальній та тестовій вибірці схильна до завищення показника моделі, тому використано оцінку на основі крос-валідації. Визначено, що найбільшій точності моделі ППР за оцінкою пікселів досягла ЗНМ, що показала результати $81.2\% \pm 21\%$.

У даній роботі перехід до попиксельного аналізу дозволив вирішити проблему нестачі даних: при використанні невеликої кількості зразків БШ було отримано датасет, придатний для машинного навчання. Проте такий підхід не дозволяє врахувати кореляційні зв'язки між різними пікселями. Крім того, в статті не описано методику виведення фінального рішення.

У [16] було розглянуто підсистему ППР на основі методів машинного навчання для зображень «зон інтересу» (region-of-interest, ROI). На відміну від [17], автори здійснювали оцінку не окремих пікселів, а всього зразка БШ. Вибірка складалась з 356 зображень «зон інтересу». Зразки було взято у 38 пацієнтів (від 3 до 14 ROI у кожного). Для кожного ROI було виміряно 16 матриць Мюллера і 9 додаткових поляризаційних параметрів. Авторами було обрано такі методи МН: XGBoost, Random forest, SVM, LDA, Logistic regression. Дані методи призначені до роботи на основі ознак, а не зображень, тому для кожного з ММЗ було пораховано середнє значення. Найвищу точність продемонструвала XGBoost: 86%. За допомогою машинного навчання авторами було визначено 5 найбільш інформативних ознак; після підготовчого етапу здійснювалось відсіювання зразків, що є викидами. Модель XGBoost, навчена та оцінена вже на 333 відібраних зразках, продемонструвала 96%. Суттєвим недоліком даної моделі виявилась висока чутливість до викидів.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики відомих методів та підсистем ППР у системах поляризаційної інтроскопії БТ і БР

Метод вимірювання	Вхідні параметри методу ППР	Метод ППР	Вид та оцінка достовірності діагностики	Програма реалізація	Література
ММЗ зразку БШ	Для кожного пікселя зображення, означеного як «здоровий» або «рак третьої стадії», розглядаються шістнадцять елементів матриці Мюллера	Дерева рішень; багатопаровий перцептрон; згорткова нейронна мережа	Рак шийки матки. Найефективніше на основі крос-валідаційної оцінки точності: згорткова нейронна мережа, $81,2\% \pm 21\%$	Python	[17]
Визначення ММЗ та параметрів поляризаційної декомпозиції, трансформації та інваріанти зразку БШ	Усереднене (медіанне) значення кожного з вимірних параметрів (16 ММЗ + 9 додаткових параметрів, всього 25 ознак)	Методи машинного навчання: XGBoost, Random forest, SVM, LDA, Logistic regression	Діагностика коло-ректального раку на основі БШ. Найефективніший метод ППР з перелічених: XGBoost, 86% на повному наборі вхідних даних, 96% на наборі, очищеному від викидів	Python	[16]
Визначення ММЗ та матриць Джонса	Оцінка статистичних моментів 1-4-го порядків	Дерева рішень	Діагностика фіброаденоми молочної залози на основі плівок плазми крові, точність 90,4%	Python	[18]

Продовження таблиці 1

Порівняльні характеристики відомих методів та підсистем ППР у системах поляризаційної інтроскопії БТ і БР

Визначення ММЗ та мюллер-матричних інваріантних суперпозицій	Оцінка статистичних, кореляційних, спектральних моментів 1-4-го порядків	Нечітка логіка	Діагностика патологій шийки матки на основі БТ, точність 98%	Python	[19, 20]
Вектори довжин елементів (мюллер-матричні інваріанти) на основі ММЗ	Оцінка статистичних та кореляційних моментів 1-4-го порядків	Логістична регресія	Діагностика раку шийки матки на основі БТ, точність 97.8%	Java	[21]

У [18] було розроблено підсистему ППР для діагностики фіброаденоми грудей з використанням методу дерев рішень на основі оцінок статистичних моментів 1-4-го порядків для наборів зображень матриць Мюллера та матриць Джонса. Дерева рішень було побудовано на основі вибірки зі 100 зразків плазми крові, попередньо оцінених за методом золотого стандарту: 50 зразків стану «норма» та 50 зразків стану «фіброаденома». Було визначено, що використання даних обох видів матриць дозволяє досягти вищого показника точності (90,4%), ніж окремо мюллер-матричної (85,35%) або джонс-матричної (87,6%) поляриметрії.

У [19, 20] було розглянуто підсистему ППР для діагностики патологій шийки матки на основі нечіткої логіки. В якості входних параметрів було використано оцінку спектральних, кореляційних і статистичних параметрів 1-4го порядків, отриманих з наборів мюллер-матричних інваріант. Для проведення дослідження було використано 102 зразки (51 стану «норма», 51 стану «патологія»). Було визначено, що нечітка логіка дозволяє створювати гнучкі моделі ППР з використанням невеликої кількості входних даних без машинного навчання. За допомогою нечіткої логіки досягнуто 98% точності при прийнятті рішення на основі інваріантної суперпозиції виду «сума».

У [21] було використано підсистему ППР на основі логістичної регресії для діагностики раку шийки матки на основі БТ. В якості входних даних ППР використовувалися оцінки статистичних та кореляційних моментів. Машинне навчання здійснювалось з використанням 46 зразків (23 зразки з верифікованим станом «норма», 23 зразки з верифікованим станом «рак шийки матки»). Прийняття рішення моделлю здійснювалось на основі векторів довжин мюллер-матричних елементів. Було досягнуто точності 97,8%.

Спираючись на порівняльні характеристики відомих методів ППР та їх реалізацій, можна визначити, що доцільним є використання Мюллер- та Джонс-матричних зображень та отриманих на їх основі ознак як входних даних для моделей машинного навчання, нейронних мереж та нечіткої логіки.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз методів ППР в системах поляризаційної інтроскопії довів, що актуальним напрямком є застосування інтелектуальних методів ППР, які базуються на визначенні істотних ознак двовимірних розподілів параметрів оптико-анізотропної структури БШ, отриманих в результаті багатопараметричного поляризаційного вимірювання.

Було визначено, що такі методи, як нечітка логіка, деякі методи машинного навчання (дерева рішень, XGBoost) та нейронні мережі (багатошаровий перцептрон) дозволяють досягти підвищення точності поляризаційної діагностики БШ до рівня 81-98%. Проте отримані результати точності можуть бути завищеними через недосконалість моделей оцінювання та способи формування вибірок, що потребує подальшого дослідження.

Отже, в результаті проведеного аналізу було визначено ряд моделей ППР, доцільних до застосування у системах поляризаційної інтроскопії, проаналізовано відомі рішення та визначено перспективи подальшого розвитку.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Alalia, S., Vitkin, A., "Polarized light imaging in biomedicine: emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment," *J. Biomed. Opt.* 20(6), 061104 (2015).
2. Znan, H., Voelz, G., and M. Kupinski, "Parametr-based imaging from passive multispectral polarimetric measurements," *Opt. Express* 27, 28832 (2019).
3. Lee, H. R., Li, P., Yoo, T.S. et al., "Digital histology with Mueller microscopy: how to mitigate an impact of tissue cut thickness fluctuations," *J. Biomed. Opt.* 27 (7), 076004 (2019).
4. Vasyuk, V.L., Kalashnikov, A.V., Ushenko, A.G. et al., "Digital Information Methods of Polarization, Mueller-Matrix and Fluorescent Microscopy," Springer Nature Singapore, 2023. 102 p.
5. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V., Okarskyi H.H., "Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies," *Proceedings of SPIE*. 11369, 113691S, P. 501-513 (2020).
6. Khan, S., Qadir, M., Khalid, A. et al., "Characterization of cervical tissue using Mueller matrix polarimetry," *Lasers in Med Scienc.* 38 (1) (2023)
7. Jiao, S., Wang, L. V. "Jones-matrix imaging of biological tissues with quadruple-channel optical coherent tomography," *J. Biomed. Opt.* 7(3), 350-358 (2002) doi: 10.1117/1.1483878.
8. Zabolotna, N. I., Radchenko, K. O. and Karas, O.V., "Method and system of Jones-matrix mapping of blood plasma films with "fuzzy" analysis in differentiation of breast pathology changes," *Proc. SPIE* 10612, 106121P (2018).
9. Ushenko, A.G., Zhytaryuk V.G., Vanchulyak, Ya. O. et al., "Statistical and cross-correlation structure of Jones-matrix images of polycrystalline films of biological fluids," *Proc. SPIE* 10977, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies IX, 109773T, December 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2323586>.
10. Zabolotna, N.I., Dovhaliuk, R.Y., "Orientational tomography of optical axes directions distributions of multilayer biological tissues birefringent polycrystalline networks," *Proc. SPIE* 8873, 887313 (2013).
11. Zabolotna, N.I., Oliinychenko, B.P., Radchenko, K.O. et al., "System of polarization phasometry of polycrystalline blood plasma networks in mammary gland pathology diagnostics," *Proc. of SPIE* 9613, 961311; (2015).
12. Ushenko, Y. A. et al., "Diagnostics of Structure and Physiological State of Birefringent Biological Tissues: Statistical, Correlation and Topological Approaches," *Handbook of Coherent_Domain Optical Methods*, New York: Springer Science+Business Media, 107-148 (2013).
13. Qin, Z. et. al., "How convolutional neural network see the world: a survey of convolutional neural network visualization methods," *CoRR* abs/1804.11191 (2018).
14. Zadeh, Lotfi A., "Fuzzy logic: principles, applications, and perspectives," *Proc. SPIE*. Vol.1468. (1991).
15. Osisanwo, F. et al., "Supervised machine learning algorithms: classification and comparison", *Int. J. Comput. Trends Technol.* 48 (3), 128-138 (2017).
16. Majumdar, A., Lad, J., Tumanova, K. et al., "Machine learning based local recurrence prediction in colorectal cancer using polarized light imaging," *J. Biomed. Opt.* 29(15), 052915 (2024).
17. Robinson, D., Hoong, K., Kleijn, W. B. et al., "Polarimetric imaging for cervical pre-cancer screening aided by machine learning: ex vivo studies," *J. Biomed. Opt.* 28(10), 102904 (2023).
18. Radchenko, O.K., "Intellectualized Mueller-Jones matrix system of laser polarimetry for breast fibroadenoma diagnosis," *Proc. SPIE* 10750, 107500M (2018); doi: 10.1117/12.2320130.
19. Заболотна, Н.І., Шолота, В.В. "Метод та підсистема підтримки прийняття рішення для мюллер-матричної лазерної поляризаційної діагностики біологічних тканин", *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології* 1, 43-52 (2022).
20. Zabolotna, N. I., Sholota, V. V., Satymbekov, M., Komada, P., "Azimuthally invariant system of Mueller-matrix polarization diagnosis of biological layers with fuzzy logical methods of decision-making," *Proc.of SPIE*, 12476, 1247608 (2022) doi: 10.1117/12.2659208.
21. Zabolotna, N., Sholota, V., Zhumagulova, S. et. al., "System of polarization mapping and intellectual analysis of Mueller matrix invariants of biological layers in the assessment of pathologies," *Proc. SPIE* 12985, 129850Q. (2023) doi.org/10.1117/12.3023049.

REFERENCES

1. Alalia, S., Vitkin, A., "Polarized light imaging in biomedicine: emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment," *J. Biomed. Opt.* 20(6), 061104 (2015).
2. Znan, H., Voelz, G., and M. Kupinski, "Parametr-based imaging from passive multispectral polarimetric measurements," *Opt. Express* 27, 28832 (2019).
3. Lee, H. R., Li, P., Yoo, T.S. et al., "Digital histology with Mueller microscopy: how to mitigate an impact of tissue cut thickness fluctuations," *J. Biomed. Opt.* 27 (7), 076004 (2019).
4. Vasyuk, V.L., Kalashnikov, A.V., Ushenko, A.G. et al., "Digital Information Methods of Polarization, Mueller-Matrix and Fluorescent Microscopy," Springer Nature Singapore, 2023. 102 p.
5. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V., Okarskyi H.H., "Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies," *Proceedings of SPIE*. 11369, 113691S, P. 501-513 (2020).
6. Khan, S., Qadir, M., Khalid, A. et al., "Characterization of cervical tissue using Mueller matrix polarimetry," *Lasers in Med Scienc.* 38 (1) (2023)

7. Jiao, S., Wang, L. V. "Jones-matrix imaging of biological tissues with quadruple-channel optical coherent tomography," J. Biomed. Opt. 7(3), 350–358 (2002) doi: 10.1117/1.1483878.
8. Zabolotna, N. I., Radchenko, K. O. and Karas, O.V., "Method and system of Jones-matrix mapping of blood plasma films with "fuzzy" analysis in differentiation of breast pathology changes," Proc. SPIE 10612, 106121P (2018).
9. Ushenko, A.G., Zhytaryuk V.G., Vanchulyak, Ya. O. et al., "Statistical and cross-correlation structure of Jones-matrix images of polycrystalline films of biological fluids," Proc. SPIE 10977, Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics, and Nanotechnologies IX, 109773T, December 2018. <https://doi.org/10.1117/12.2323586>.
10. Zabolotna, N.I., Dovhaliuk, R.Y., "Orientational tomography of optical axes directions distributions of multilayer biological tissues birefringent polycrystalline networks," Proc. SPIE 8873, 887313 (2013).
11. Zabolotna, N.I., Oliinychenko, B.P., Radchenko, K.O. et al., "System of polarization phasometry of polycrystalline blood plasma networks in mammary gland pathology diagnostics," Proc. of SPIE 9613, 961311; (2015).
12. Ushenko, Y. A. et al., "Diagnostics of Structure and Physiological State of Birefringent Biological Tissues: Statistical, Correlation and Topological Approaches," Handbook of Coherent_Domain Optical Methods, New York: Springer Science+Business Media, 107–148 (2013).
13. Qin, Z. et al., "How convolutional neural network see the world: a survey of convolutional neural network visualization methods," CoRR abs/1804.11191 (2018).
14. Zadeh, Lotfi A., "Fuzzy logic: principles, applications, and perspectives," Proc. SPIE. Vol.1468. (1991).
15. Osisanwo, F. et al., "Supervised machine learning algorithms: classification and comparison", Int. J. Comput. Trends Technol. 48 (3), 128-138 (2017).
16. Majumdar, A., Lad, J., Tumanova, K. et al., "Machine learning based local recurrence prediction in colorectal cancer using polarized light imaging," J. Biomed. Opt. 29(15), 052915 (2024).
17. Robinson, D., Hoong, K., Kleijn, W. B. et al., "Polarimetric imaging for cervical pre-cancer screening aided by machine learning: ex vivo studies," J. Biomed. Opt. 28(10), 102904 (2023).
18. Radchenko, O.K., "Intellectualized Mueller-Jones matrix system of laser polarimetry for breast fibroadenoma diagnosis," Proc. SPIE 10750, 107500M (2018); doi: 10.1117/12.2320130.
19. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V. "Metod ta pidsystema pidtrymky pryiniattia rishennia dlia miuller-matrychnoi lazernoi poliaryzatsiinoi diahnostryky biolohichnykh tkanyn", Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii 1, 43-52 (2022).
20. Zabolotna, N. I., Sholota, V. V., Satymbekov, M., Komada, P., "Azimuthally invariant system of Mueller-matrix polarization diagnosis of biological layers with fuzzy logical methods of decision-making," Proc.of SPIE, 12476, 1247608 (2022) doi: 10.1117/12.2659208.
21. Zabolotna, N., Sholota, V., Zhumagulova, S. et. al., "System of polarization mapping and intellectual analysis of Mueller matrix invariants of biological layers in the assessment of pathologies," Proc. SPIE 12985, 129850Q. (2023) doi.org/10.1117/12.3023049.

Надійшла до редакції 10.03.25 р.

ШОЛОТА ВЛАДИСЛАВА ВЛАДИСЛАВІВНА – асистент кафедри комп'ютерних наук, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,
e-mail: lada.sholota@vntu.edu.ua

V.V.SHOLOTA

ANALYSIS OF DECISION SUPPORT METHODS IN POLARIZATION INTROSCOPY SYSTEMS OF BIOLOGICAL TISSUES AND FLUIDS

Vinnitsia National Technical University

УДК 681.784.7:615.849.19

С.М. ПАШКОВСЬКИЙ, Ю.О. ПИЛИПЕЦЬ, С.В. ПАВЛОВ,
Я.І. ЯРОСЛАВСЬКИЙ, О.С. ВОЛОСОВИЧ

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ЕХОКАРДІОГРАФІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ ДЛЯ ОЦІНКИ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО СТАНУ СЕРЦЯ

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, Україна

Військово-медичний клінічний центр Центрального регіону, м. Вінниця, Україна

Національний університет «Одеська Політехніка»

ДП «Вінницький науково-дослідний та проектний інститут землеустрою»

Анотація. Ультразвукові зображення серця є важливим джерелом діагностичної інформації для виявлення серцево-судинних захворювань. Сьогодні автоматизована обробка та аналіз таких зображень активно досліджуються у сферах телемедицини, цифрової обробки медичних зображень та штучного інтелекту, зокрема — для пришвидшення і точності діагностики патологій серця. У цій роботі розглядається новий підхід до обробки ехокардіографічних даних, що передбачає перетворення ультразвукових відео або серій зображень у кольорові проекції фазового простору. Це дозволяє створити інформативні візуальні представлення, придатні для аналізу за допомогою глибоких згорткових нейронних мереж. Такий підхід має дві ключові переваги: [1] він забезпечує можливість застосування сучасних архітектур глибокого навчання для розпізнавання серцевих патологій, [2] дає змогу використовувати техніки трансферного навчання, що значно підвищує ефективність моделі навіть на невеликих наборах даних.

Ключові слова: ехокардіографія, біомедичні зображення, глибоке навчання, згорткові нейронні мережі, обробка зображень, серцеві патології, трансферне навчання, штучний інтелект, діагностика серця, фазовий простір

Abstract. Ultrasound images of the heart are an important source of diagnostic information for the detection of cardiovascular diseases. Today, automated processing and analysis of such images are actively studied in the fields of telemedicine, digital medical image processing, and artificial intelligence, in particular, to accelerate and accurately diagnose cardiac pathologies. This paper considers a new approach to processing echocardiographic data, which involves converting ultrasound videos or series of images into color phase space projections. This allows you to create informative visual representations suitable for analysis using deep convolutional neural networks. This approach has two key advantages: [1] it provides the ability to use modern deep learning architectures for the recognition of cardiac pathologies, [2] it allows the use of transfer learning techniques, which significantly increases the efficiency of the model even on small data sets.

Keywords: echocardiography, biomedical imaging, deep learning, convolutional neural networks, image processing, cardiac pathologies, transfer learning, artificial intelligence, cardiac diagnostics, phase space

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-193-199

ВСТУП

Ультразвукове медичне зображення є одним із ключових інструментів для неінвазивного отримання візуальної інформації про внутрішні органи людини, зокрема серце. Серед усіх методів візуалізації саме ехокардіографія (УЗД серця) відіграє провідну роль у сучасній діагностиці серцево-судинних захворювань, завдяки своїй доступності, безпечності та високій інформативності.

Ультразвукова діагностика серця базується на використанні відбитих ультразвукових хвиль для формування зображення серцевих структур і оцінки їх функціонування. Дані, зібрані з допомогою УЗД-датчика, проходять цифрову обробку, яка включає перетворення, фільтрацію, усунення шумів, реконструкцію зображень та їх подальшу інтерпретацію.

В умовах розвитку цифрової медицини особливого значення набувають інтелектуальні системи обробки ехокардіографічних зображень. Застосування методів глибокого навчання, зокрема згорткових нейронних мереж, дає змогу автоматизувати аналіз складних структур серця, проводити сегментацію камер і клапанів, а також здійснювати попередню оцінку функціонального стану міокарда.

Такі технології не лише підвищують точність діагностики, а й забезпечують оперативну обробку великого обсягу даних, що особливо актуально для дистанційного моніторингу та телемедичних систем. Впровадження інтелектуальних підходів в обробку ехокардіографічних зображень сприяє покращенню якості медичних послуг та оптимізації роботи медичних закладів[3,4].

1. ТЕХНОЛОГІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В КАРДІОЛОГІЧНІЙ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ

Ехокардіографія – це один із найінформативніших методів дослідження серцево-судинної системи. Використовуючи ультразвукові хвилі, лікар отримує зображення серця в реальному часі, що дозволяє оцінити:

- ✓ Будову серця. Виявлення вроджених або набутих вад.
- ✓ Стан клапанів. Діагностика стенозу або недостатності клапанів.
- ✓ Функціонування серцевого м'яза. Визначення здатності серця перекачувати кров.
- ✓ Наявність рідини в перикардії. Виявлення запальних процесів або патологічного накопичення рідини.

Ехокардіографія є безпечною, безболісною та неінвазивною процедурою, яка не має протипоказань [15].

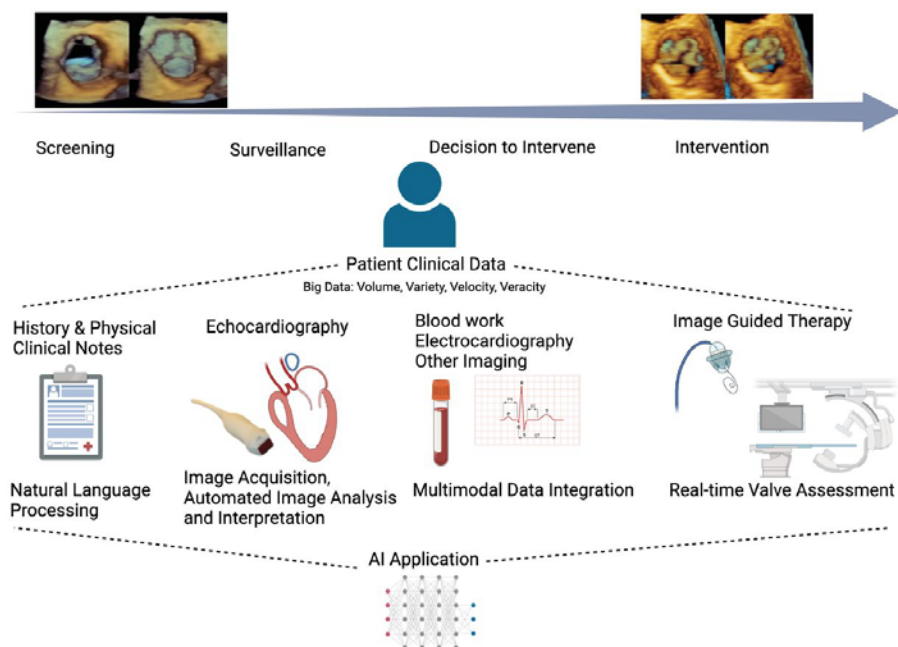


Рисунок 1 – Шлях пацієнта за серцевим захворюванням та сфери діагностики, де інтелектуалізовані системи можуть покращити лікування та ведення пацієнта [13]

Штучний інтелект (ШІ) — це технологія, яка дозволяє виявляти приховані взаємозв'язки між різними змінними (предикторами) та результатами. Його основна перевага полягає у здатності аналізувати великі масиви даних, знаходити складні, у тому числі нелінійні, залежності без необхідності попередніх знань про ці взаємозв'язки. Такі обсяги даних, що охоплюють різні типи інформації та мають

значну швидкість накопичення, називають «великими даними». Їх відрізняють чотири ключові характеристики: обсяг, різноманіття, швидкість обробки та достовірність [5, 7, 16].

Сьогодні пацієнтські дані — це типові приклади великих даних, які включають клінічні показники, зображення медичної візуалізації, електрофізіологічну та геномну інформацію. ШІ дозволяє інтегрувати ці різноманітні джерела та на їх основі формувати точні прогнози. Завдяки доступності потужних обчислювальних ресурсів сучасний ШІ здатен обробляти величезні обсяги даних і приймати складні рішення за значно менший час, ніж це під силу людині.

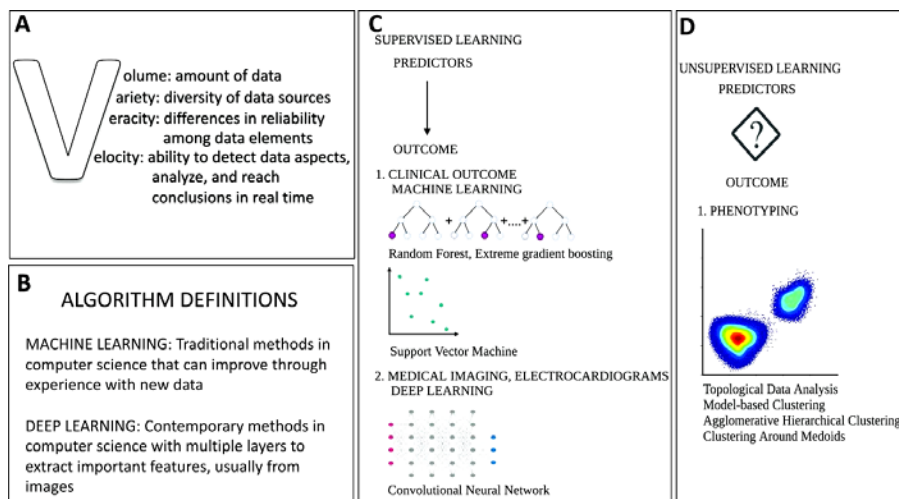


Рисунок 2 – (А) Характеристики великих даних. (В) Загальні визначення ШІ. (С) Загальні архітектури моделей, що використовуються в ШІ, залежать від мети моделювання. (D) За допомогою навчання без учителя предиктори візуалізуються на графіку для знаходження природної кластеризації даних.

Залежно від характеру клінічної задачі, до аналізу медичних даних, зокрема зображень, застосовуються різні алгоритми штучного інтелекту. Серед них найширше використовується згортова нейронна мережа (ЗНМ), яка виявила особливу ефективність у сфері медичної візуалізації. Її архітектура побудована за аналогією із зоровою корою головного мозку людини й дозволяє виділяти важливі характеристики зображення шляхом послідовного застосування фільтрів. Ці особливості потім пов'язуються з відповідними діагностичними висновками. Хоча цей підхід може досягати високої точності, він потребує значних обчислювальних ресурсів та великих обсягів навчальних зображень для ефективного функціонування [6,9].

Сьогодні ШІ вже активно використовується для автоматизованого аналізу ЕКГ, визначення розмірів серцевих камер за даними КТ і МРТ, а також для інтерпретації ехокардіографії — зокрема аналізу деформації серцевого м'яза та доплерівського дослідження у двовимірному форматі. З огляду на провідну роль ехокардіографії у діагностиці серцево-судинних захворювань, саме ця методика є найбільш перспективною для інтеграції алгоритмів штучного інтелекту. Ехокардіографічні дослідження генерують велику кількість даних, включаючи кілька режимів сканування, проекцій і послідовностей зображень, що створює ідеальне середовище для застосування AI-моделей. Завдяки цьому відкриваються нові можливості для автоматизації візуальної оцінки серцевих клапанів і виявлення нових діагностичних маркерів шляхом фенотипування на основі великих даних.

2. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ СИСТЕМИ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ ОЦІНКИ КЛАПАНІВ НА ЕХОКАРДІОГРАФІЧНОМУ ЗОБРАЖЕННІ ЗА ДОПОМОГОЮ ШІ

Застосування штучного інтелекту (ШІ) в аналізі ехокардіографічних зображень у пацієнтів із серцево-судинними захворюваннями охоплює чотири ключові напрями: (1) отримання зображень, (2) розпізнавання зображень, (3) сегментація структур та (4) автоматизоване визначення патологічних станів.

Отримання зображень

У пацієнтів із порушеннями серцевого ритму ехокардіографічна діагностика має на меті формування якісних зображень, які дозволяють оцінити ступінь ураження клапанного апарату серця, а

також його вплив на суміжні анатомічні структури. Зокрема, важливим є чітке візуалізування стулок клапанів, характеристик регургітаційних струменів, джерела турбулентного потоку при стенозах та отримання повного доплерівського сигналу безперервної хвилі (CW). Високоякісне отримання таких зображень потребує відповідної підготовки, особливо в ситуаціях зі складною гемодинамікою або нетиповим розташуванням потоку. Деякі медичні заклади вже впроваджують стандартизовані підходи, як-от система “buddy scan”, для покращення якості досліджень, зокрема при виявленні градієнтів при аортальному стенозі. Проте це залишається трудомістким і часозатратним процесом.

Інтеграція ІІІ у цей етап відкриває перспективи підвищення ефективності шляхом створення програм, що автоматизують процес отримання ехозображень. Першочергово ці системи орієнтуються на стандартні проекції, такі як парастернальні та апікальні, і демонструють обнадійливі результати. Так, одне з досліджень показало, що медсестри без досвіду, використовуючи алгоритм ІІІ, змогли отримати ехозображення клапанів серця з високим рівнем діагностичної придатності: 91,7% для аортального клапана, 96,3% — мітрального і 83,3% — тристулкового. Подальший розвиток таких систем дає змогу застосовувати їх на ранніх стадіях для діагностики мітральної чи тристулкової регургітації, а також при доплерівському аналізі аортального стенозу [10,12].

Ідентифікація перегляду

Аналогічно до вже реалізованих алгоритмів, які визначають ехокардіографічні зрізи лівого шлуночка, штучний інтелект (ІІІ) має потенціал значно покращити оцінку клапанної функції. Зокрема, йдеться про можливість автоматичної ідентифікації зображень, які містять інформацію про клапани, що дозволить здійснювати «стекову» інтерпретацію, проводити автоматизовані вимірювання та підтримувати клінічне рішення відповідно до чинних діагностичних рекомендацій.

Такі рішення здатні суттєво зекономити час клініцистів та підвищити якість ехокардіографічних звітів, зменшуючи варіативність оцінки ступеня ураження. Наприклад, у випадку мітральної регургітації рівень узгодженості між різними спеціалістами може сягати лише 61%, що підкреслює потребу у стандартизації оцінки.

Початковим етапом у розробці таких інтелектуальних систем є автоматичне визначення зображень, що включають клапанну анатомію. Незважаючи на наявність багатьох публікацій, присвячених ідентифікації стандартних ехокардіографічних зрізів, лише деякі з них зосереджуються на точному розпізнаванні клапанних структур або доплерівських сигналів. Одне з досліджень описує застосування алгоритму ІІІ для ідентифікації стулок мітрального і тристулкового клапанів в апікальному чотирикамерному зрізі. Система продемонструвала високу точність — 98% для мітрального клапана та 90% для тристулкового [8,13].

Також відзначено успішне визначення доплерівських сигналів, зокрема: точність розпізнавання безперервної хвилі сягала 98%, у той час як для імпульсної хвилі — 83%, що пояснюється візуальною схожістю ПХ-сигналів із низькоамплітудними сигналами CW. Ці результати підтверджують перспективність ІІІ в покращенні точності та ефективності аналізу клапанної функції серця.

Сегментація зображень

Сегментація зображень є ключовим етапом в автоматизованому аналізі медичних зображень на основі штучного інтелекту. Вона дозволяє підвищити точність, об'єктивність і відтворюваність кількісної оцінки структур серця, виконуючи розпізнавання цільових анатомічних об'єктів, окреслення їх меж і проведення відповідних вимірювань.

Цей підхід застосовується як до двовимірних (2D), так і до тривимірних (3D) ехокардіографічних зображень і дозволяє автоматизувати визначення розмірів та функціональних характеристик серцевих камер. Хоча більшість подібних розробок базується на навчальних вибірках із попередньо маркованими зображеннями, поступово з'являються дослідження, в яких створюються алгоритми, здатні виконувати сегментацію без ручного втручання — на основі неструктурованих даних.

Окрім камер серця, алгоритми сегментації можуть бути застосовані для аналізу таких анатомічних структур, як кільце клапанів, стулки, регургітаційні струмені та доплерівські спектральні профілі. Це розширює можливості автоматизованої діагностики і дозволяє здійснювати більш точну та об'єктивну оцінку функціонального стану серця у пацієнтів з серцево-судинними патологіями [11, 17, 18].

Клапанне кільце та стулка

Аналіз клапанного кільця та стулок серцевих клапанів на основі тривимірної ехокардіографії активно впроваджується завдяки використанню як комерційних, так і некомерційних програм, які застосовують методи штучного інтелекту для автоматизованого вимірювання структур серця — зокрема аортального, мітрального та тристулкового клапанів.

Перші програмні рішення у цій галузі здебільшого базувались на класичних обчислювальних алгоритмах, які автоматизували вимірювання за допомогою математичних правил, а не на методах

глибокого навчання, таких як згорткові нейронні мережі (CNN). У сучасних версіях програмних продуктів, ймовірно, вже використовуються компоненти штучного інтелекту, хоча через закритість комерційного програмного забезпечення точна інформація про реалізовані алгоритми залишається недоступною.

Загалом, існуючі програмні пакети мають певні обмеження. Зокрема, деякі з них вимагають участі спеціаліста на етапі ініціалізації та налаштування (тобто не є повністю автономними), тоді як інші — сумісні лише з ехокардіографічними зображеннями, отриманими з апаратів конкретного виробника. Це обмежує їхню універсальність і інтеграцію в багатопрофільні медичні системи [13,14].

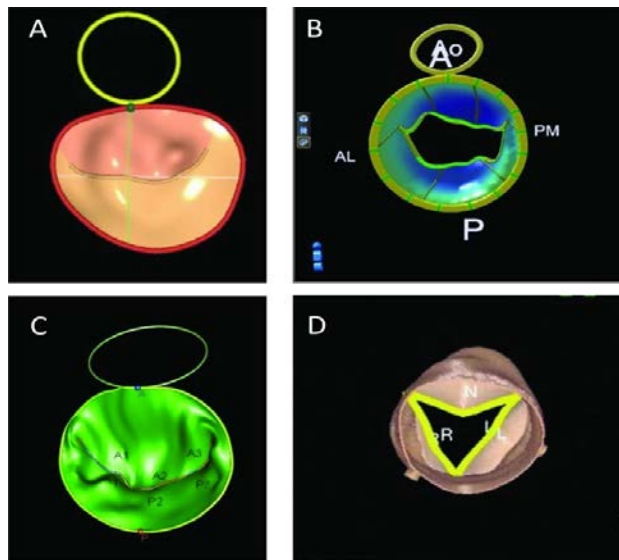


Рисунок 3 – Приклади зображень комерційного програмного забезпечення для аналізу клапанів. Моделі мітрального клапана від (A) GE, (B) Philips та (C) TomTec. (D) Модель аортального клапана від Siemens. A – передній; AL – передньобілатеральний; Ao – аорта; L – ліва коронарна стулка; N – некоронарна стулка; P – задня; PM – постеромедіальна; R – права коронарна стулка

Окрім комерційних рішень, розробляються також некомерційні програмні засоби, спрямовані на підтримку процесу сегментації анатомічних структур серцевих клапанів — зокрема клапанного кільця та стулок. Ці програми зазвичай базуються на архітектурах згорткових нейронних мереж (CNN) і орієнтовані на обробку зображень мітрального клапана.

Ефективність таких систем зазвичай оцінюється за допомогою коефіцієнта Dice, який відображає точність ідентифікації зображення. Отримані значення варіюються від помірного до високого рівня точності, із показниками в діапазоні 0,48–0,79. Водночас рівень помилок у проведенні автоматичних вимірювань залишався відносно низьким: середнє відхилення для периметра кільця становило приблизно $6,1\% \pm 4,5\%$, а для площі — $11,94\% \pm 10\%$.

Однією з ключових переваг цих алгоритмів є їхня здатність ефективно працювати навіть із зображеннями низької якості, що робить їх перспективними для застосування в умовах обмеженої апаратної бази. Основні труднощі, однак, пов'язані з похибками в окресленні меж мітрального клапана, що часто зумовлено артефактами, які можуть спричинити помилкову інтерпретацію анатомічних структур.

3. ВИСНОВКИ

Інтеграція методів штучного інтелекту, зокрема згорткових нейронних мереж, в обробку ехокардіографічних зображень відкриває нові можливості для діагностики серцево-судинних захворювань. Сучасні системи дозволяють автоматизувати ключові етапи аналізу — від отримання якісних зображень до їх розпізнавання, сегментації та інтерпретації функціонального стану серцевих структур.

Автоматизовані інструменти демонструють високу точність в ідентифікації клапанних стулок, аналізі доплерівських сигналів та виконанні кількісних вимірювань. Застосування ШІ дає змогу підвищити об'єктивність діагностики, зменшити залежність від людського фактору та зекономити час

медичних працівників. Особливо перспективним напрямом є сегментація камер серця та клапанних структур, яка забезпечує точні вимірювання навіть на зображеннях низької якості.

Незважаючи на поточні технічні обмеження — як-от потреба в ініціалізації спеціалістом чи обмежена сумісність з апаратним забезпеченням — розвиток як комерційних, так і некомерційних програмних рішень свідчить про стрімке зростання ролі ШІ у сучасній кардіології. Подальші дослідження, орієнтовані на підвищення точності, універсальності та автономності таких систем, сприятимуть ще більш ефективній інтеграції інтелектуальних технологій у клінічну практику.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Natsheh, Q.; S' al 'agean, A.; Zhou, D.; Edirisinghe, E. Automatic Selective Encryption of DICOM Images. *Appl. Sci.* 2023, 13, 4779. <https://doi.org/10.3390/app13084779>
2. Monika, R.; Dhanalakshmi, S.; Rajamanickam, N.; Yousef, A.; Alroobaea, R. Coefficient-Shuffled Variable Block Compressed Sensing for Medical Image Compression in Telemedicine Systems. *Bioengineering* 2024, 11, 1101. <https://doi.org/10.3390/bioengineering11111101>
3. Lin, C.-C.; Lin, Y.-H.; Chu, E.-T.; Tai, W.-L.; Lin, C.-J. VUF-MIWS: A Visible and User-Friendly Watermarking Scheme for Medical Images. *Electronics* 2025, 14, 122. <https://doi.org/10.3390/electronics14010122>
4. Ferreira, F.; Pires, I.M.; Ponciano, V.; Costa, M.; Villasana, M.V.; Garcia, N.M.; Zdravetski, E.; Lameski, P.; Chorbev, I.; Mihajlov, M.; et al. Experimental Study on Wound Area Measurement with Mobile Devices. *Sensors* 2021, 21, 5762. <https://doi.org/10.3390/s21175762>
5. Eric J. Topol: High-performance medicine: the convergence of human and artificial intelligence. *Nature Medicine* 2019, 25, 44-56. <https://gwern.net/doc/ai/nn/2019-topol.pdf>
6. Harimi, A.; Majd, Y.; Gharahbagh, A.A.; Hajhashemi, V.; Esmailyan, Z.; Machado, J.J.M.; Tavares, J.M.R.S. Classification of Heart Sounds Using Chaogram Transform and Deep Convolutional Neural Network Transfer Learning. *Sensors* 2022, 22, 9569. <https://doi.org/10.3390/s22249569>
7. Lesport, Q.; Joerger, G.; Kaminski, H.J.; Girma, H.; McNett, S.; Abu-Rub, M.; Garbey, M. Eye Segmentation Method for Telehealth: Application to the Myasthenia Gravis Physical Examination. *Sensors* 2023, 23, 7744. <https://doi.org/10.3390/s23187744>
8. Harun-Ar-Rashid, M.; Chowdhury, O.; Hossain, M.M.; Rahman, M.M.; Muhammad, G.; AlQahtani, S.A.; Alrashoud, M.; Yassine, A.; Hossain, M.S. IoT-Based Medical Image Monitoring System Using HL7 in a Hospital Database. *Healthcare* 2023, 11, 139. <https://doi.org/10.3390/healthcare11010139>
9. Ferreira, F.; Pires, I.M.; Ponciano, V.; Costa, M.; Villasana, M.V.; Garcia, N.M.; Zdravetski, E.; Lameski, P.; Chorbev, I.; Mihajlov, M.; et al. Experimental Study on Wound Area Measurement with Mobile Devices. *Sensors* 2021, 21, 5762. <https://doi.org/10.3390/s21175762>
10. Zanella A, Bui N, Castellani A et al. (2014) Internet of things for smart cities. *IEEE Internet of Things Journal* 1(1): 22-32. 6. Zeng Y, Zhang L, Gupta P (2019) Internet of things (IoT) in healthcare: A comprehensive survey on trends and advances. *IEEE Access* 7: 115365-115381.
11. Nedadur R, Wang B, Tsang W Artificial intelligence for the echocardiographic assessment of valvular heart disease *Heart* 2022;108:1592-1599
12. Jiang, L., Zuo, H. J., & Chen, C. (2025). Artificial intelligence in echocardiography: Applications and future directions. *Fundamental Research*. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2025.01.020>
13. Labs, R. B., Zolgharni, M., & Loo, J. P. (n.d.). *Echocardiographic image quality assessment using deep neural networks*. School of Computing and Engineering, University of West London; National Heart and Lung Institute, Imperial College, London, UK.
14. Liu, W., Wang, Q., Zhang, P., Deng, Y., Zhao, Y., Zhang, Y., Xu, H., Qiu, X., Chen, X., Xu, J., & He, K. (2025). Automated echocardiogram image quality assessment with YOLO and ResNet in the left ventricular myocardium of A4C views. *Applied Intelligence*, 55, Article 513. <https://doi.org/10.1007/s10489-025-06419-z>
15. Ivanushkina, N. H., & Ivanko, K. O. (2014). Digital processing of low-amplitude components of electrocardiosignals. Mykolaiv: FOP Shvets V. D.
16. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
17. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.

18. Y. Pylypets, S. Pavlov, Y. Yaroslavsky, S. Kostyuk, and M. Ursan, "Features of the application of telemedical technologies based on artificial intelligence in disaster medicine," Opt-el. inf-energ. tech., vol. 48, no. 2, pp. 190–195, Nov 2024.

Надійшла до редакції 05.02.25 р.

ПАШКОВСЬКИЙ СЕРГІЙ МИКОЛАЙОВИЧ – к.м.н., полковник медичної служби, начальник Військово-медичного клінічного центру Центрального регіону, м. Вінниця, Україна,
e-mail: y-vmkc@ps.mil.gov.ua

ПИЛИПЕЦЬ ЮЛІЯ ОЛЕКСАНДРІВНА – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптикоелектронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, офіцер відділення зв'язку, Військово-медичний клінічний центр Центрального регіону, м. Вінниця, Україна, **e-mail: y.hopanchuk@med.mil.ua**

ПАВЛОВ СЕРГІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ – д.т.н., професор кафедри біомедичної інженерії та оптикоелектронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,
e-mail: psv@vntu.edu.ua

ЯРОСЛАВСЬКИЙ ЯРОСЛАВ ІВАНОВИЧ – к.т.н., старший викладач кафедри біомедичної інженерії, Національний університет «Одеська Політехніка, директор, ДП «Вінницький науково-дослідний та проектний інститут землеустрою», Вінниця, Україна,
e-mail: yaroslavskyidzk@gmail.com

ВОЛОСОВИЧ ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ — аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптикоелектронних систем, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна, 21021; **e-mail: sashka.v0@gmail.com**

SERHII PASHKOVSKIY, YULIIA PYLYPETS, SERGII PAVLOV,
YAROSLAV YAROSLAVSKYY, OLEKSANDR VOLOSOVYCH
**INTELLIGENT ECHOCARDIOGRAPHIC IMAGE PROCESSING SYSTEMS FOR ASSESSING
THE FUNCTIONAL STATE OF THE HEART**
Military Medical Clinical Center of the Central Region, Vinnytsia, Ukraine
Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine
Odessa Polytechnic National University, SE "Vinnytsia Research and Design Institute of Land Management",
Vinnytsia, Ukraine

УДК 681.7: 616-71

Н.І. ЗАБОЛОТНА

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МЕТОД ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ В БАГАТОПАРАМЕТРИЧНІЙ СИСТЕМІ АЗИМУТАЛЬНО ІНВАРІАНТНОЇ МЮЛЛЕР- ПОЛЯРИМЕТРІЇ ПРИ ОЦІНЮВАННІ ПАТОЛОГІЙ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
e-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com*

Анотація. В статті представлено метод підтримки прийняття рішення в багатопараметричній системі мюллер-матричної діагностики біологічних шарів на основі статистичного та вейвлет-аналізу колекції азимутальних інваріантів мюллер-поляриметрії та моделей дерев рішень для підвищення точності рішень. Розроблено тренувальні моделі дерев рішень на основі мінімізації індексу Джині для інформативних ознак розподілів азимутально незалежних інваріант біологічного шару м'язу шийки матки та оцінено точність виявлення патології на їх основі. Продemonстровано експериментальне застосування удосконаленого методу ППР при диференціації функціональних станів «норма» – «патологія» БШ м'язової тканини шийки матки із вимірюванням десяти розподілів азимутальних інваріант мюллер-поляриметричних параметрів БШ. Досягнуто зростання точності діагностики зразків БШ до рівня 97,2%.

Ключові слова: підтримка прийняття рішення, зображення, система мюллер-поляриметрії біологічного шару, статистичний аналіз, вейвлет-аналіз, метод дерев рішень.

Abstract. The article presents a method for supporting decision-making in a multiparametric system of Muller-matrix diagnostics of biological layers based on statistical and wavelet analysis of a collection of azimuthal invariants of Muller-polarimetry and decision tree models to increase the accuracy of decisions. Training decision tree models based on minimization of the Gini index for informative features of the distributions of azimuthally independent invariants of the biological layer of the cervix are developed and the accuracy of pathology detection based on them is assessed. The experimental application of the improved PPR method in the differentiation of functional states of "normal" and "pathology" of the cervical muscle tissue of the uterine cervix with the measurement of ten distributions of azimuthal invariants of the Muller-polarimetric parameters of the uterine cervix has been demonstrated. An increase in the diagnostic accuracy of uterine cervix samples to the level of 97.2% has been achieved.

Key words: decision support, images, biological layer Muller polarimetry system, statistical analysis, wavelet analysis, decision tree method.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-200-208

ВСТУП

Серед сучасних тенденцій розвитку технологій медичної лазерної діагностики біологічних тканин і рідин виокремлюється лазерна зображувальна мюллер-матрична поляриметрія [1–6]. Вона зарекомендувала себе як високочутливий та надійний метод додаткового оцінювання патологічних змін при онкологічних та запальних процесах тканин шийки матки, грудних залоз, кишечника, шлунку, в тому числі й на ранніх стадіях [6–10].

В основі мюллер-поляриметричної діагностики лежить встановлення взаємозв'язків зміни параметрів мікроструктурної оптичної анізотропії досліджуваних біологічних шарів (БШ), викликаних порушенням їх здорового фізіологічного стану в результаті захворювання, з 2D мюллер-матричними зображеннями (ММЗ) БШ [5, 6].

Використання аналізу вимірних азимутально інваріантних (AI) елементів ММЗ біологічних шарів, специфічних сум та різниць окремих розподілів елементів ММЗ [11], які не змінюються при зміні положення зразка БШ відносно осі їх опромінення, підвищило достовірність діагностики БШ в системах мюллер-матричної поляриметрії.

З іншого боку, інтелектуальні методи підтримки прийняття рішень (ППР), що базуються на машинному навчанні [12, 13], неймережевих [14], статистичних підходах [6], алгоритмах дерева рішень [15], зарекомендували себе як вагомий чинник для покращення достовірності діагностики в системах лазерної поляриметрії БТ. Так, імплементація методів ППР в системи AI мюллер-матричної поляриметрії дозволила підвищити достовірність методів діагностики на основі ІММЗ біологічних тканин на 1,5%-2% [16, 17].

Проте актуальність пошуку нових методів аналізу AI поляризаційних параметрів на основі ММЗ для діагностики БШ з поєднанням інтелектуальних методів ППР залишається очевидною.

Метою роботи є покращення діагностичних можливостей азимутально інваріантної поляриметрії БШ на основі ММЗ за рахунок удосконалення методу ухвалення діагностичного рішення в багатопараметричній системі зображувальної мюллер-поляриметрії при оцінюванні патологій.

АЗИМУТАЛЬНІ ІНВАНТИ МЮЛЛЕР-ПОЛЯРИМЕТРІЇ БІОЛОГІЧНИХ ШАРІВ ТА АРХІТЕКТУРА СИСТЕМИ ДЛЯ ЇХ ВИЗНАЧЕННЯ

Зразки досліджуваних біологічних шарів, підготовлених за технологією нативних гістологічних зрізів певних ділянок біологічних тканин, зберігаються в замороженому вигляді. Вимоги до них: геометрична товщина до 30 мкм та коефіцієнт оптичної екстинції до 0,1. Остання вимога задовільняє умову одноразової взаємодії фотону з матеріалом БШ, що обумовлює можливість достовірної строгої діагностики структури БШ під впливом патологічних, біологічних чи запальних змін.

Основні елементи та взаємозв'язки багатопараметричної системи для вимірювання AI мюллер-поляриметрії досліджуваних БШ проілюстровано схемою на рисунку 1.

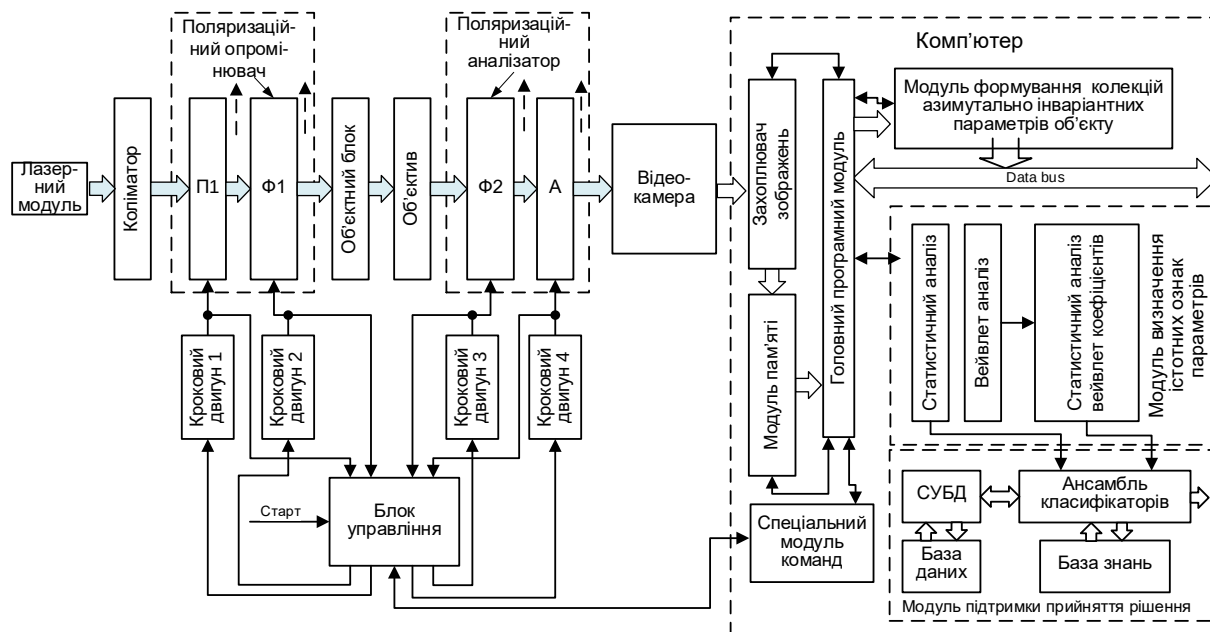


Рисунок 1 – Багатопараметрична система для вимірювання AI мюллер-поляриметрії БШ з інтелектуальними методами ППР

Модуляцію поляризації світла від лазерного джерела на довжині хвилі 450 мкм виконує поляризаційний опромінювач, який містить поляризатор лінійний П1 та фазову чвертьхвильову пластинку Ф1, що можуть обертатись навколо своїх осей, застосовуючи приводи від двох відповідних крокових двигунів. Поліризаційний аналізатор містить такі ж елементи Ф2 та А (аналізатор) та з такою ж

властивістю обертання навколо своїх осей, як і поляризаційний опромінювач, але розташовані в зворотному порядку. Вони також здійснюють обертання із застосуванням приводів від третього та четвертого крокових двигунів. Крім того, є ще можливість Ф1 та Ф2 прибирати із шляху проходження лазерного променя.

Падаючий лазерний пучок з обраним типом поляризації $a \in \{0^0, 90^0, +45^0, \otimes\}$ потрапляє на об'єктний блок із зразком БШ. Після розсіювання зразком лазерний пучок проходить через об'єкти, конфігуруючи потім можливі стани поляризації аналізатора $b \in \{0^0, 90^0, +45^0, 135^0, \otimes, \oplus\}$. В результаті для обчислення повного набору ММЗ маємо 24 розподіли інтенсивності $I_b^a(x, y)$, виявлені відеокамерою та збережені в комп'ютері. На їх основі можна обчислити повний набір $M_{kl}(x, y), k = \overline{1:4}; l = \overline{1:4}$ ММЗ зразка БШ за відомими формулами [6, 16]. Проте в даній статті інтерес представляють лише АІ елементи набору ММЗ.

За результатами досліджень [11, 16, 17] встановлено колекцію АІ мюллер-поляриметричних вимірювань, яка містить такі елементи: $M_{11}(x, y), M_{14}(x, y), M_{41}(x, y), M_{44}(x, y)$; суперпозиції $S_{22,33}(x, y)$ (додавання), $D_{23,32}(x, y)$ (віднімання) інших ММЗ (додавання та віднімання); розподіли $VD_{12,13}(x, y), VD_{21,31}(x, y), VD_{24,34}(x, y), VD_{42,43}(x, y)$ векторних відстаней між елементами ММЗ, які визначають за формулами:

$$\begin{aligned} S_{22,33}(x, y) &= M_{22}(x, y) + M_{33}(x, y), \\ D_{23,32}(x, y) &= M_{23}(x, y) - M_{32}(x, y), \\ VD_{12,13}(x, y) &= \sqrt{M_{12}^2(x, y) + M_{13}^2(x, y)}, \\ VD_{21,31}(x, y) &= \sqrt{M_{21}^2(x, y) + M_{31}^2(x, y)}, \\ VD_{42,43}(x, y) &= \sqrt{M_{42}^2(x, y) + M_{43}^2(x, y)}, \\ VD_{24,34}(x, y) &= \sqrt{M_{24}^2(x, y) + M_{34}^2(x, y)}. \end{aligned} \tag{1}$$

За допомогою модуля визначення істотних ознак вимірних розподілів (1) та модуля ППР в системі, наведений на рисунку 1, здійснюється подальше діагностичне оцінювання патологій.

МЕТОД ППР НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ КОЛЕКЦІЇ АЗИМУТАЛЬНИХ ІНВАНІАНТІВ МЮЛЛЕР-ПОЛЯРИМЕТРІЙ ТА МОДЕЛЕЙ ДЕРЕВ РІШЕННЯ

Сучасний аналіз двовимірних розподілів поляризаційних характеристик базується, зокрема, на статистичному підході. Застосування оцінок статистичних моментів $M_1 - M_4$ від першого до четвертого порядків дозволило охарактеризувати ступінь різноманітності досліджуваних двовимірних розподілів вимірних поляризаційних мюллер-матричних параметрів при оцінюванні патологій БТ [18], зменшуючи при цьому обсяг обчислень, необхідних для проведення діагностичної класифікації.

Проте з аналізом та класифікацією великорозмірних зображень без переходу до відповідних векторів їх ознак допомагають справлятися сучасні технології машинного навчання, результати застосування яких до розподілів мюллер-матричних елементів БШ описано в ряді публікацій [12, 13]. В той же час, відсутність достатньої за обсягом бази знань мюллер-матричної діагностики БШ спонукає до пошуку інших шляхів у отриманні унікальної додаткової інформації про досліджуваний оптико-анізотропний БШ.

В цьому сенсі доцільним є застосування вейвлет-аналізу для оцінювання різномасштабної структури зображень АІ мюллер-поляриметрії БШ, який називають «математичним мікроскопом» [8]. Він надає інформацію про розвиток відносного вкладу компонент різного масштабу в двовимірний розподіл АІ ММЗ у вигляді так званого спектру коефіцієнтів вейвлет – перетворення $\Psi_{a,b}(x)$. В цій

функції за аналогією з «математичним мікроскопом» параметри a та b відображають параметри «збільшення» та «точку фокусу мікроскопу» відповідно.

Розподіл будь-якого елемента колекції АІ мюллер-поляриметричних вимірювань, представлений в одновимірному вигляді як $f(x)$, можна розкласти в ряд у вигляді

$$f(x) = \sum_{a,b=-\infty}^{+\infty} C_{a,b} \cdot \Psi_{a,b}(x), \quad (2)$$

де $C_{a,b}$ – розрахункові коефіцієнти на масштабах, заданих параметрами масштабування a , а також зміщення b .

Якщо просканувати в кожному рядку досліджуваній розподіл АІ ММЗ розмірності $(m \times n)$ в напрямку осі ОХ з визначеним кроком функцією МНАТ [19] з подальшим усередненням, то отримаємо двовимірний розподіл вейвлет коефіцієнтів $\Psi_{a,b}(x)$ та їх різномасштабні двовимірні перерізи у вигляді $C_{a,b}$.

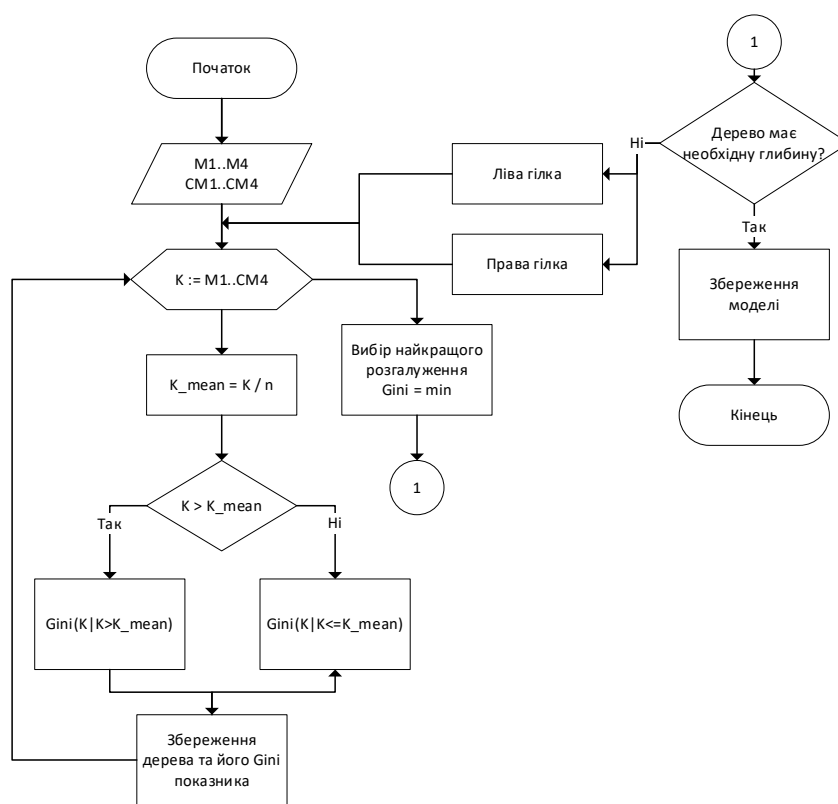


Рисунок 2 – Алгоритм роботи модуля ППР на основі методу дерев рішень

Застосовуючи до двовимірних розподілів $C_{a,b}(x)$ на різних масштабах $a_{\min} \div a_{\max}$ статистичний аналіз, визначаємо середнє, дисперсію, асиметрію та ексцес таких розподілів, як додаткові інформативні $CM_1 \div CM_4$ параметри АІ мюллер-поляриметричних зображень БТ.

Отже, в результаті застосування статистичного аналізу до двовимірних розподілів АІ мюллер-поляриметрії та розподілів вейвлет-коефіцієнтів на різних масштабах, отримаємо вектор інформативних ознак із 8 елементів для подальшої класифікації біологічних шарів при їх діагностиці, представлений як

$$V = [M_1, M_2, M_3, M_4, CM_1, CM_2, CM_3, CM_4]. \quad (2)$$

Враховуючи необхідність виконання класифікації за всіма елементами колекції АІ мюллер-поляриметричних вимірювань, отримаємо ансамбль класифікаторів, кожен із яких може видавати свій результат.

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Для вирішення такої задачі було обрано інтелектуальний метод дерев рішень [19], що базується на правилах, знайдених в даних тренувальної вибірки. Представлення моделі рішення зі структурою дерева, дозволяє рухатись по гілках та вузлах, кожного разу ставлячи питання екземпляру, аж до моменту остаточного визначення класу в кінцевих вузлах.

Мінімізація функції витрат, яка застосовується в процесі машинного навчання за методом дерев рішень, відбувається за коефіцієнтом $Gini_i$ [20], обчисленим для i -го вузла на основі ймовірності p_{ij} появи екземпляру певного класу серед загальної кількості екземплярів у вузлі за формулою:

$$Gini_i = 1 - \sum_{j=1}^R (p_{ij})^2. \quad (3)$$

Блок-схема алгоритму роботи модуля ППР на основі методу рева рішень наведена на рисунку 2. Визначивши серед обрахованих коефіцієнтів $Gini_i$ для кожної істотної ознаки вектора (2) найкращу з точки зору мінімального значення, формується перше розгалуження в блок-схемі. Після поточної перевірки на досяжність деревом необхідної глибини відбувається збереження моделі за позитивної відповіді та подальше розгалуження обчислень в рекурсивному порядку за негативної відповіді.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

В наведеній на рисунку 1 системі було проведено вимірювання колекції із 10 азимутальних інваріантів ММЗ для зразків м'язової тканини шийки матки контрольної групи (21 зразок) та групи з патологією шийки матки (21 зразок). Приклади візуалізації шести із десяти відповідних двовимірних розподілів АІ ММЗ представників обох груп наведено на рисунку 3.

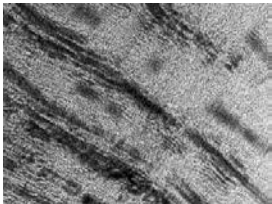
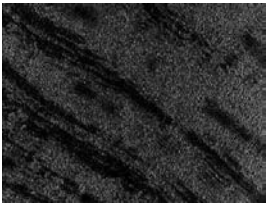
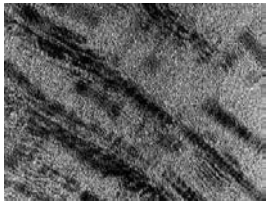
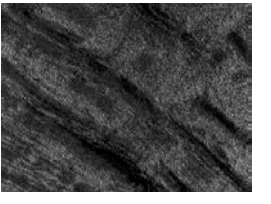
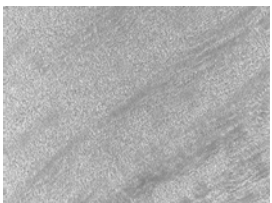
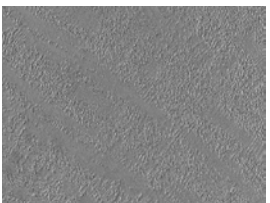
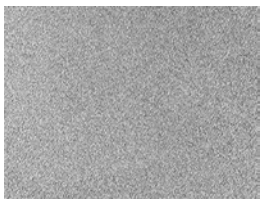
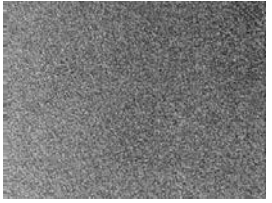
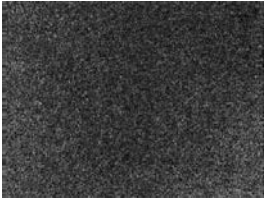
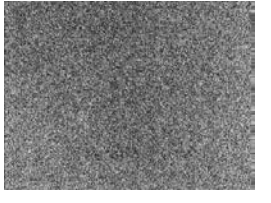
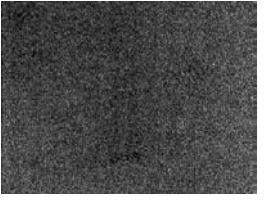
	$VD_{12,13}$ норма	$VD_{21,31}$ норма	$VD_{24,34}$ норма	$VD_{42,43}$ норма
				
	$S_{22,33}$ норма	$D_{23,32}$ норма	$S_{22,33}$ патологія	$D_{23,32}$ патологія
2				
	$VD_{12,13}$ патологія	$VD_{21,31}$ патологія	$VD_{24,34}$ патологія	$VD_{42,43}$ патологія
				

Рисунок 3 – Візуалізація двовимірних розподілів поляризаційних АІ мюллер-поляриметрії БШ м'язу шийки матки при нормі та патології

Проведений аналіз отриманих розподілів дозволив визначити усереднені значення елементів вектора ознак (2) для класу норми та патології. На їх основі проводились тренування моделі ППР на основі методу дерев рішень та оцінка моделей. Бібліотека `scikit-learn` та класифікатор `DecisionTreeClassifier` було застосовано для тренування моделі, в якій використано змінні X з розмірністю (42 -число екземплярів, 10 – тип розподілу AI MM3, 8 – число інформативних ознак).

```
from sklearn.tree import DecisionTreeClassifier
classifiers = []
for i in range(10):
    model = DecisionTreeClassifier(
        max_depth=3,
        criterion='gini',
        splitter='best'
    )
    model.fit(X[:, i], y)
    classifiers.append(model)
```

Рисунок 4 – Фрагмент коду для тренувального процесу на основі дерев рішень для AI MM3

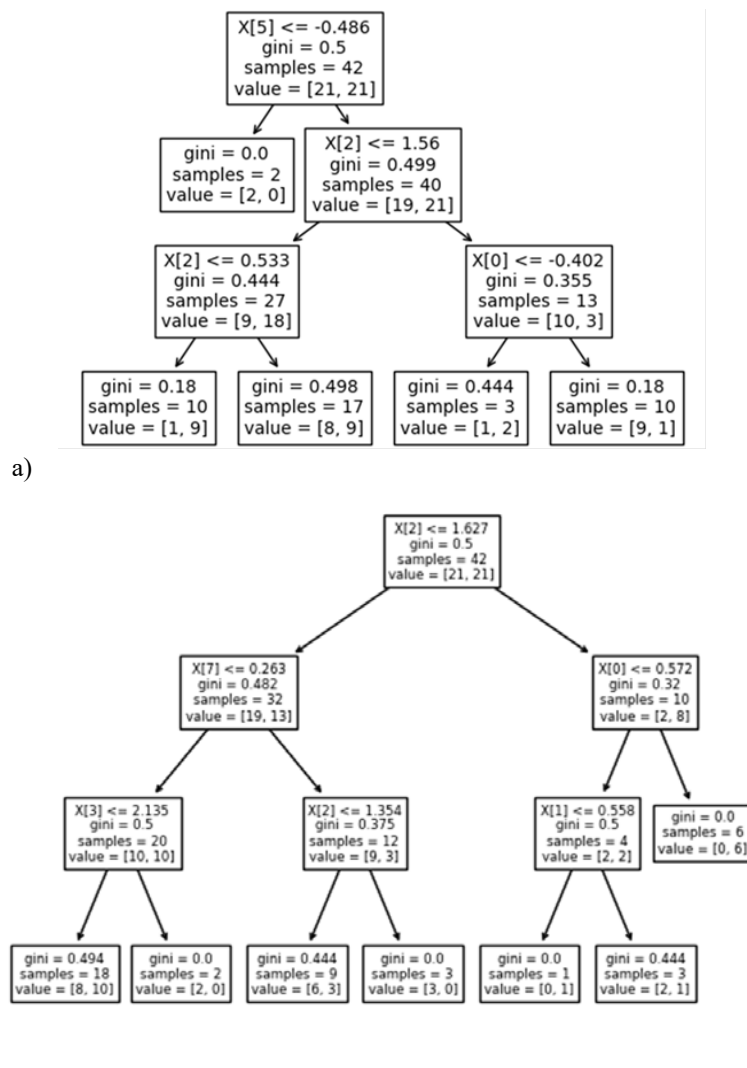


Рисунок 5 – Приклади структури моделі дерева рішення для класифікації БШ за AI MM3:

а) для M_{14} ; б) для $S_{22,33}$

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Моделі, натреновані від DecisionTreeClassifier, записано в змінну classifiers (рисунок 4). Приклад таких моделей для конкретних AI мюллер-поляриметрії БШ показано на рисунку 5.

Загальна точність класифікації (достовірність рішення) на основі натренованих моделей в подальшому визначалась на основі визначення відсотку правильно класифікованих досліджуваних екземплярів до загальної кількості досліджуваних екземплярів.

За даними таблиці 1, в якій наведено результати оцінювання збалансованої точності (A_c , %) методу дерев рішень для класифікації векторів ознак вимірюного AI мюллер-поляриметрії БШ, можна судити про достовірність оцінювання досліджуваної патології шийки матки. Прийняті в таблиці 1 позначення діагностованих станів: Тр (істинно «хворий»), Тп (істинно «здоровий»), Fр (хибно «хворий»), Fп (хибно «здоровий»). Обсяг вибірки зразків для діагностики в системі – 42 зразки, серед яких 28 зразків – навчальна вибірка.

Таблиця 1

Оцінка діагностичної точності за типами AI мюллер-поляриметрії БШ в системі з ППЗ на основі дерев рішень

Тип розподілу AI ММЗ	Розподіл рішень за категоріями,				Точність
	Тр	Fп	Тп	Fр	
$M_{11}(x, y)$	20	2	18	3	90,5%
$M_{14}(x, y)$	18	3	20	2	90,5%
$M_{41}(x, y)$	20	2	19	2	92,8%
$M_{44}(x, y)$	21	1	20	2	97,2%
$S_{22,33}(x, y)$	20	1	21	1	97,2%
$D_{23,32}(x, y)$	19	2	20	1	92,8%
$VD_{12,13}(x, y)$	20	2	18	3	90,5%
$VD_{21,31}(x, y)$	19	2	18	3	88,1%
$VD_{42,43}(x, y)$	19	2	19	2	90,5%
$VD_{24,34}(x, y)$	19	2	20	1	92,8%

Порівнюючи отримані результати оцінювання діагностичної точності зразків БШ м'яза шийки матки з формуванням різних типів розподілу вимірюваних параметрів AI ММЗ в розробленій системі, видно, що досягнуто показників здебільшого високого рівня точності діагностики.

У порівнянні з аналогами варто зазначити, що метод ППР на основі аналізу колекції AI мюллер-поляриметрії та моделей дерев рішення дозволив отримати максимальну точність діагностики на рівні 97,2% при вимірюваних елементах $M_{44}(x, y)$ та $S_{22,33}(x, y)$, що тенденційно узгоджується з результатами, описаними в роботах [16-18].

Розширення функціональних можливостей системи діагностики на основі вимірювання та аналізу не окремих розподілів AI ММЗ, а сукупності всіх десяти елементів колекції AI, залишається як можливий чинник подальшого зростання достовірності діагностики БШ.

В той же час, доречно зазначити, що моделі оцінювання точності машинного навчання при використанні повного обсягу навчальної вибірки схильні впливати на завищення показників точності, тому це питання потребує подальшого дослідження.

ВИСНОВКИ

Удосконалено метод ППР для системи багатопараметричної поляризаційної діагностики БШ біологічних шарів за рахунок застосування статистичного та вейвлет-аналізу колекції азимутальних інваріантів мюллер-поляриметрії БШ та моделей дерев рішення для підвищення точності прийнятих рішень.

Продemonстровано експериментальне застосування удосконаленого методу ППР при диференціації функціональних станів «норма» – «патологія» БШ м'язової тканини шийки матки із вимірюванням десяти розподілів азимутальних інваріант мюллер-поляриметричних параметрів БШ. Досягнуто зростання точності діагностики зразків БШ до рівня 97,2%.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ghosh, N., Vitkin, I. A., "Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook," *J. Biomed. Opt.* 16(11), 110801 (2011).
2. Alalia, S., Vitkin, A., "Polarized light imaging in biomedicine: emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment," *J. Biomed. Opt.* 20(6), 061104 (2015).
3. Lee, H. R., Li, P., Yoo, T.S. et al., "Digital histology with Mueller microscopy: how to mitigate an impact of tissue cut thickness fluctuations," *J. Biomed. Opt.* 27 (7), 076004 (2019).
4. Ma, H., He, H., Ramella-Roman, J.C., "Mueller matrix microscopy," *Polarized Light in Biomedical Imaging and Sensing*. 11, P. 281–320 (2024).
5. Vasyuk, V.L., Kalashnikov, A.V., Ushenko, A.G. et al., "Digital Information Methods of Polarization, Mueller-Matrix and Fluorescent Microscopy," Springer Nature Singapore, 2023. 102 p.
6. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V., Okarskyi H.H., "Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies," *Proceedings of SPIE*. 11369, 113691S, P. 501-513 (2020).
7. Khan, S., Qadir, M., Khalid, A. et al., "Characterization of cervical tissue using Mueller matrix polarimetry," *Lasers in Med Scienc.* 38 (1) (2023) DOI:10.1007/s10103-023-03712-6.
8. Sdobnov, A., Ushenko, V.A., Trifonyuk, L. et al., "Mueller-matrix imaging polarimetry elevated by wavelet decomposition and polarization-singular processing for analysis of specific cancerous tissue pathology," *J. Biomed. Opt.* 28(10), 102903 (2023).
9. Tumanova, K., Serra S., Madumdar, A. et al., "Mueller matrix polarization parameters correlate with local recurrence in patients with stage III colorectal cancer," *Sci Rep.* 13(1), 13424 (2023).
10. Kim, M., Lee, H.R., Ossikovskii, R. et al., "Optical diagnosis of gastric tissue with Mueller microscopy and statistical analysis," *J. Europ. Opt. Soc. Rapid Publ.* 18(2) (2022) DOI: 10.1051/jeos/2022011.
11. Dubozov, A., Peyvasteh, M., Tryfonyuk, M.L. et al., "Mueller-matrix-based azimuthal invariant tomography of polycrystalline structure within benign and malignant soft-tissue tumours," *Laser Physics Letters*. 17(11), 115606 (2020).
12. Majumdar, A., Lad, J., Tumanova, K. et al., "Machine learning based local recurrence prediction in colorectal cancer using polarized light imaging," *J. Biomed. Opt.* 29(15), 052915 (2024) DOI: 10.1117/1.JBO.29.5.052915.
13. Dong, Y. et al., "A polarization-imaging-based machine learning framework for quantitative pathological diagnosis of cervical precancerous lesions," *IEEE Trans. Med. Imaging*. 40 (12). PP.3728-3738. (2021).
14. Qin, Z. et. al. "How convolutional neural network see the world: a survey of convolutional neural network visualization methods," *CoRR abs/1804.11191* (2018).
15. Luu, N. T. et al., "Characterization of Mueller matrix elements for classifying human skin cancer utilizing random forest algorithm", *J. Biomed. Opt.* 2021. Vol. 26(7), 075001.
16. Zabolotna, N., Sholota, V., Satymbekov M. et al., "Azimuthally invariant system of Mueller-matrix polarization diagnosis of biological layers with fuzzy logical methods of decision-making," *Proceedings of SPIE* 12476, 1247608. (2022) DOI: 10.1117/12.2659208/
17. Zabolotna, N., Sholota, V., Zhumagulova, S. et al., "System of polarization mapping and intellectual analysis of Mueller matrix invariants of biological layers in the assessment of pathologies," *Proceedings of SPIE* 12985, 129850Q (2023).
18. Заболотна, Н.І., Шолота, В.В., "Метод та підсистема підтримки прийняття рішення для мюллер-матричної лазерної поляризаційної діагностики біологічних тканин," *Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології* 1(43) С. 43–52 (2022) <https://doi.org/10.31649/1681-7893-2022-43-1-43-52>.
19. Robinson, D., Hoong, K., Kleijn, W. B. et al. "Polarimetric imaging for cervical pre-cancer screening aided by machine learning: ex vivo studies," *J. Biomed. Opt.* 28(10), 102904 (2023).

REFERENCES

1. Ghosh, N., Vitkin, I. A., "Tissue polarimetry: concepts, challenges, applications, and outlook," *J. Biomed. Opt.* 16(11), 110801 (2011).

2. Alalia, S., Vitkin, A., "Polarized light imaging in biomedicine: emerging Mueller matrix methodologies for bulk tissue assessment," J. Biomed. Opt. 20(6), 061104 (2015).
3. Lee, H. R., Li, P., Yoo, T.S. et al., "Digital histology with Mueller microscopy: how to mitigate an impact of tissue cut thickness fluctuations," J. Biomed. Opt. 27 (7), 076004 (2019).
4. Ma, H., He, H., Ramella-Roman, J.C., "Mueller matrix microscopy," Polarized Light in Biomedical Imaging and Sensing. 11, P. 281–320 (2024).
5. Vasyuk, V.L., Kalashnikov, A.V., Ushenko, A.G. et al., "Digital Information Methods of Polarization, Mueller-Matrix and Fluorescent Microscopy," Springer Nature Singapore, 2023. 102 p.
6. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V., Okarskyi H.H., "Methods and systems of polarization reproduction and analysis of the biological layers structure in the diagnosis of pathologies," Proceedings of SPIE. 11369, 113691S, P. 501-513 (2020).
7. Khan, S., Qadir, M., Khalid, A. et al., "Characterization of cervical tissue using Mueller matrix polarimetry," Lasers in Med Scienc. 38 (1) (2023) DOI:10.1007/s10103-023-03712-6.
8. Sdobnov, A., Ushenko, V.A., Trifonyuk, L. et al., "Mueller-matrix imaging polarimetry elevated by wavelet decomposition and polarization-singular processing for analysis of specific cancerous tissue pathology," J. Biomed. Opt. 28(10), 102903 (2023).
9. Tumanova, K., Serra S., Madumdar, A. et al., "Mueller matrix polarization parameters correlate with local recurrence in patients with stage III colorectal cancer," Sci Rep. 13(1), 13424 (2023).
10. Kim, M., Lee, H.R., Ossikovskii, R. et al., "Optical diagnosis of gastric tissue with Mueller microscopy and statistical analysis," J. Europ. Opt. Soc. Rapid Publ. 18(2) (2022) DOI: 10.1051/jeos/2022011.
11. Dubozov, A., Peyvaste, M., Tryfonyuk, M.L. et al., "Mueller-matrix-based azimuthal invariant tomography of polycrystalline structure within benign and malignant soft-tissue tumours," Laser Physics Letters. 17(11), 115606 (2020).
12. Majumdar, A., Lad, J., Tumanova, K. et al., "Machine learning based local recurrence prediction in colorectal cancer using polarized light imaging," J. Biomed. Opt. 29(15), 052915 (2024) DOI: 10.1117/1.JBO.29.5.052915.
13. Dong, Y. et al., "A polarization-imaging-based machine learning framework for quantitative pathological diagnosis of cervical precancerous lesions," IEEE Trans. Med. Imaging. 40 (12). PP.3728-3738. (2021).
14. Qin, Z. et al. "How convolutional neural network see the world: a survey of convolutional neural network visualization methods," CoRR abs/1804.11191 (2018).
15. Luu, N. T. et al., "Characterization of Mueller matrix elements for classifying human skin cancer utilizing random forest algorithm", J. Biomed. Opt. 2021. Vol. 26(7), 075001.
16. Zabolotna, N., Sholota, V., Satymbekov M. et al., "Azimuthally invariant system of Mueller-matrix polarization diagnosis of biological layers with fuzzy logical methods of decision-making," Proceedings of SPIE 12476, 1247608. (2022) DOI: 10.1117/12.2659208/
17. Zabolotna, N., Sholota, V., Zhumagulova, S. et al., "System of polarization mapping and intellectual analysis of Mueller matrix invariants of biological layers in the assessment of pathologies," Proceedings of SPIE 12985, 129850Q (2023).
18. Zabolotna, N.I., Sholota, V.V., "Metod ta pidsystema pidtrymky pryiniattia rishennia dlia miuller-matrychnoi lazernoi poliaryzatsiinoi diahnozyky biolohichnykh tkanyn," Optyko-elektronni informatsiino-enerhetychni tekhnolohii 1(43) S. 43–52 (2022).
19. Robinson, D., Hoong, K., Kleijn, W. B. et al. "Polarimetric imaging for cervical pre-cancer screening aided by machine learning: ex vivo studies," J. Biomed. Opt. 28(10), 102904 (2023).

Надійшла до редакції 17.04.25 р.

ЗАБОЛОТНА НАТАЛІЯ ІВАНІВНА – д.т.н., доцент, професор кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна,
E-mail: Natalia.zabolotna@gmail.com

N.I.ZABOLOTNA

**INTELLECTUAL METHOD OF SUPPORTING DECISION MAKING IN A MULTI-PARAMETER
SYSTEM OF AZIMUTHALLY INVARIANT MUELLER-POLARIMETRIC
IN PATHOLOGIES ASSESSMENT**

Vinnitsia National Technical University

УДК 53.0

О.С. КОРНІЛЕНКО, О.В. КАРАСЬ

ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ ОПТИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ СІТКІВКИ ПРИ ДІАБЕТИЧНІЙ РЕТИНОПАТІЇ

Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна, e-mail: okornilenko@vntu.edu.ua

Анотація. У статті розглядаються можливості застосування штучного інтелекту (ШІ) для автоматизованої інтерпретації оптичних зображень сітківки при діабетичній ретинопатії. Описано основні методи візуалізації, зокрема фундус-фотографію та оптичну когерентну томографію, а також проаналізовано алгоритми глибокого навчання, які застосовуються для виявлення ретинопатичних змін. Проведено оцінку ефективності сучасних автономних систем, таких як IDx-DR та EyeArt, та визначено основні обмеження їх використання. Особливу увагу приділено етичним, технічним і правовим аспектам впровадження ШІ в офтальмологічну практику. Стаття підкреслює потенціал ШІ як інструмента для раннього скринінгу та профілактики втрати зору у хворих на діабет.

Ключові слова: діабетична ретинопатія, штучний інтелект, глибоке навчання, фундус-зображення, автоматизована діагностика, офтальмологія

Abstract. This article explores the application of artificial intelligence (AI) for the automated interpretation of optical retinal images in diabetic retinopathy. It presents the main imaging methods, including fundus photography and optical coherence tomography, and analyzes deep learning algorithms used to detect retinopathic changes. The study evaluates the effectiveness of current autonomous systems, such as IDx-DR and EyeArt, and outlines key limitations of their use. Special attention is given to ethical, technical, and legal aspects of AI implementation in ophthalmic practice. The article highlights AI's potential as a tool for early screening and prevention of vision loss in diabetic patients.

Keywords: diabetic retinopathy, artificial intelligence, deep learning, fundus imaging, automated diagnosis, ophthalmology

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-209-216

ВСТУП

Цукровий діабет — одне з найпоширеніших хронічних захворювань сучасності, яке супроводжується низкою системних ускладнень, серед яких особливе місце посідає діабетична ретинопатія (ДР). Це ураження судинної системи сітківки, що без належного контролю може призвести до часткової або повної втрати зору. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, майже третина пацієнтів із діабетом має ті чи інші ознаки ретинопатії, а в багатьох випадках патологічні зміни залишаються непоміченими через відсутність симптомів на ранніх стадіях. З огляду на це, надзвичайно важливим стає завдання своєчасного виявлення ДР, що передбачає регулярне обстеження сітківки за допомогою оптичних методів візуалізації.

Однак у багатьох регіонах, особливо у сільських або малозабезпечених районах, спостерігається брак офтальмологів і відповідної технічної бази для систематичного скринінгу. Це створює потребу у впровадженні інноваційних технологічних рішень, зокрема систем автоматизованої діагностики на основі штучного інтелекту (ШІ). Завдяки сучасним алгоритмам глибокого навчання, зокрема згортковим нейронним мережам, з'явилась можливість точно і швидко інтерпретувати фундус-знімки без участі лікаря. Такі системи вже продемонстрували високу ефективність і навіть отримали регуляторне схвалення в деяких країнах.

Метою даної роботи є всебічне дослідження можливостей застосування штучного інтелекту для автоматизованої інтерпретації оптичних зображень сітківки у пацієнтів із діабетичною ретинопатією. У межах дослідження розглядаються принципи функціонування сучасних алгоритмів ШІ, методи візуалізації сітківки, ефективність і точність існуючих систем, а також аналізуються ключові виклики та перспективи подальшого розвитку в цьому напрямі.

Діабетична ретинопатія (ДР) — це мікросудинне ускладнення цукрового діабету, що вражає сітківку ока і є однією з провідних причин сліпоти серед працездатного населення у світі. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, майже кожна третя людина з діабетом має певну форму ураження сітківки, причому ризик зростає з тривалістю хвороби та рівнем глікемічного контролю [1].

Патогенез діабетичної ретинопатії пов'язаний із хронічною гіперглікемією, яка призводить до ушкодження ендотелію судин сітківки, порушення кровообігу, гіпоксії тканин і збільшення проникності судин. Це зумовлює утворення мікроаневризм, крововиливів, твердих ексудатів, набряку макули та неоваскуляризації — патологічного розростання нових судин, яке характерне для тяжких стадій захворювання. ДР класифікується на непроліферативну (початкову, середню, тяжку) та проліферативну форми. Найбільш небезпечною є проліферативна ретинопатія, оскільки новоутворені судини є крихкими та схильними до розривів, що призводить до значних крововиливів у склоподібне тіло та відшарування сітківки [2].

Сучасна офтальмологія використовує декілька методів візуалізації для діагностики ДР. Найпоширенішими є фундус-фотографія (кольорові знімки очного дна), флюоресцеїнова ангіографія (для оцінки кровообігу) та оптична когерентна томографія (ОКТ), яка дозволяє виявляти набряк макули та структурні зміни в сітківці з високою роздільною здатністю. Фундус-фотографія широко використовується у скринінгових програмах завдяки своїй неінвазивності, відносній дешевизні та можливості цифрового аналізу [3].

Згідно з рекомендаціями Американської діабетичної асоціації, щорічний огляд очного дна є обов'язковим для пацієнтів з діабетом, починаючи з моменту встановлення діагнозу для пацієнтів з діабетом 2 типу, або через 5 років після діагнозу для пацієнтів з діабетом 1 типу [4]. Раннє виявлення та інтерпретація змін у сітківці є критично важливими, оскільки діабетична ретинопатія може протікати безсимптомно до моменту настання незворотних змін.

Проте, незважаючи на доступність методів діагностики, у багатьох країнах з низьким і середнім рівнем доходу не вистачає кваліфікованих офтальмологів для масового скринінгу. Саме це підсилює потребу в автоматизованих інструментах виявлення патологій сітківки, зокрема з використанням методів штучного інтелекту.

Наукові джерела підтверджують ефективність раннього втручання та лікування при ДР. Наприклад, дослідження Early Treatment Diabetic Retinopathy Study (ETDRS) показали, що лазерна фотокоагуляція може знизити ризик втрати зору при проліферативній ретинопатії на 50% [5]. У випадках із набряком макули застосовуються ін'єкції анти-VEGF препаратів (vascular endothelial growth factor inhibitors), таких як ранібізумаб та афліберцепт, які зменшують судинну проникність і знижують набряк [6].

ОПТИЧНІ МЕТОДИ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ СІТКІВКИ

Оптичні методи візуалізації є ключовими в діагностиці та моніторингу діабетичної ретинопатії, оскільки дозволяють безконтактно та неінвазивно отримати високоякісні зображення структури сітківки, виявити патологічні зміни на ранніх стадіях та контролювати ефективність лікування. Серед найпоширеніших і найбільш клінічно значущих методів виділяють кольорову фундус-фотографію, оптичну когерентну томографію (ОКТ), флюоресцеїнову ангіографію (ФА), а також сучасні мультиспектральні технології.

Фундус-фотографія (Fundus Imaging) є одним із найбільш використовуваних методів, особливо в масових скринінгових програмах. Вона полягає у створенні двовимірного кольорового зображення очного дна, на якому видно диск зорового нерва, макулу, кровоносні судини та патологічні елементи — мікроаневризми, крововиливи, ексудати. Метод дозволяє швидко отримати цифрові знімки, які легко аналізувати вручну або за допомогою алгоритмів штучного інтелекту. Згідно з дослідженням Gulshan et al. (2016), саме фундус-фотографії є базовими для навчання та валідації глибоких нейронних мереж у задачах автоматичного виявлення діабетичної ретинопатії [7].

Оптична когерентна томографія (ОКТ, Optical Coherence Tomography) є сучасним методом, що забезпечує пошарове сканування сітківки з мікронною роздільною здатністю, подібно до гістологічного зрізу. ОКТ дозволяє виявити набряк макули, деструкцію внутрішніх шарів сітківки, субретинальні

рідини й інші морфологічні зміни, які не завжди видно на фундус-знімках. Цей метод особливо ефективний для діагностики та моніторингу діабетичного макулярного набряку (DME), одного з основних чинників втрати зору у пацієнтів з діабетом (Leuschen et al., 2013). ОКТ є обов'язковим у клінічній практиці при прийнятті рішень про лікування анти-VEGF препаратами[8].

Флуоресцеїнова ангіографія (FA, Fluorescein Angiography) — це називний метод, що потребує внутрішньовенного введення барвника (флуоресцеїну) і подальшого фотографування кровотоку в сітківці. Цей метод дозволяє виявити ділянки гіпоперфузії, витоки з судин, неоваскуляризацію та капілярну оклюзію. Хоча ФА менш застосовна в рутинному скринінгу, вона незамінна при детальному плануванні хірургічного або лазерного лікування. У дослідженні Silva et al. (2011) було показано, що комбінування ФА та ОКТ забезпечує найбільш повну візуалізацію ретинопатичних змін [9].

У сучасних умовах активно розвиваються мультиспектральна візуалізація та swept-source OCT, які поєднують переваги глибшого проникнення в тканини та швидшого збору інформації. Крім того, дедалі частіше використовуються портативні офтальмологічні камери, які можна підключити до смартфонів, що особливо корисно в умовах обмеженого доступу до медичних установ [10].

Завдяки цифровій природі отриманих зображень, ці методи добре інтегруються з алгоритмами глибокого навчання, що відкриває нові можливості для автоматизованої діагностики, підвищення доступності медичної допомоги та зменшення навантаження на лікарів.

АЛГОРИТМИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ОФТАЛЬМОЛОГІЇ

Штучний інтелект (ШІ), а зокрема глибоке навчання (deep learning), нині відіграє ключову роль у трансформації підходів до медичної діагностики, зокрема в офтальмології. Завдяки високій точності та здатності до масштабування, алгоритми ШІ успішно застосовуються для виявлення діабетичної ретинопатії (ДР), дозволяючи здійснювати автоматизовану інтерпретацію офтальмологічних зображень навіть без участі лікаря. Це особливо важливо в умовах дефіциту офтальмологів у багатьох країнах та необхідності регулярного скринінгу пацієнтів із діабетом.

У центрі таких систем — згорткові нейронні мережі (Convolutional Neural Networks, CNN), які показали надзвичайну ефективність у задачах комп'ютерного зору. Ці моделі здатні автоматично навчатися виявляти візуальні патерни патологій, не потребуючи попередньої ручної інженерії ознак (feature engineering). CNN аналізує фундус-зображення на піксельному рівні та створює багаторівневу абстракцію з метою виявлення ключових ознак ДР — таких як мікроаневризми, внутрішньосітківкові крововиливи, тверді та м'які ексудати, а також новоутворені судини. Наприклад, алгоритм, побудований на архітектурі Inception v3, тренований командою Google, виявив рівень чутливості 90,3% і специфічність 98,1% на незалежному датасеті EyePACS-1, перевершивши деяких лікарів-офтальмологів за точністю [7].

Для досягнення таких результатів ШІ-системи тренуються на великих датасетах із ручною розміткою, які використовуються як "золотий стандарт". Найвідомішими серед них є EyePACS (130 000+ зображень), Messidor (1200 зображень), APTOS, IDRiD, DDR (Diabetic Retinopathy Detection) та інші. Вказані набори містять фундус-знімки, розмічені лікарями-офтальмологами за ступенем ДР — від відсутності ретинопатії до проліферативної форми. Це дозволяє навчити моделі як на класифікацію за п'ятибальною шкалою, так і на бінарну діагностику (наявність/відсутність ураження).

Часто моделі створюються за принципом transfer learning — використовується попередньо навчена модель (наприклад, на ImageNet) з подальшим донавчанням на медичних даних. Такий підхід дозволяє уникнути надмірної витрати ресурсів та зменшити вимоги до кількості спеціалізованих медичних зображень. Найчастіше застосовуються архітектури ResNet, DenseNet, EfficientNet, які мають високу точність, стабільність під час навчання та гарну здатність до генералізації. У реальних клінічних умовах особливо цінними є моделі на основі MobileNet — вони дозволяють реалізовувати діагностику навіть на мобільних пристроях, таких як смартфони чи портативні офтальмологічні камери.

Важливим етапом розвитку стала поява перших автономних ШІ-систем, схвалених для клінічного використання. Найвідомішою серед них є IDx-DR, яка у 2018 році стала першою у світі автономною ШІ-системою, що отримала схвалення FDA (Food and Drug Administration, США) для самостійної діагностики діабетичної ретинопатії без участі лікаря. Вона працює як програмно-апаратний комплекс, до якого завантажуються фундус-знімки, і система виводить клінічне рішення — чи слід пацієнта направити до офтальмолога. Клінічні випробування IDx-DR показали чутливість 87,4% і специфічність 89,5%, що свідчить про її надійність у практичному застосуванні [3].

Окремої уваги заслуговують сегментаційні моделі, які не лише класифікують ступінь ураження, а й візуально виділяють уражені ділянки на зображенні сітківки. Найчастіше для цього використовується архітектура U-Net, яка дозволяє точно локалізувати патологічні утворення. Застосування **attention-**

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

механізмів (наприклад, SE-Net або Attention U-Net) покращує інтерпретованість моделі, фокусуючи обчислювальні ресурси на найбільш релевантних ділянках зображення.

З метою підвищення довіри лікарів до рішень моделей, в дослідженнях широко використовуються візуалізаційні техніки на кшталт Grad-CAM (Gradient-weighted Class Activation Mapping), які показують, на якій ділянці зображення модель "зосередилась" при прийнятті рішення. Такі інструменти роблять ШІ-моделі більш прозорими та зрозумілими, що є критично важливим для впровадження в медичну практику.

СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ДІАГНОСТИКИ

Автоматизовані системи діагностики діабетичної ретинопатії, засновані на алгоритмах штучного інтелекту, поступово переходять із дослідницьких лабораторій до реального клінічного застосування. Їх основна мета — забезпечення раннього виявлення уражень сітківки у пацієнтів з діабетом, навіть у тих регіонах, де немає постійного доступу до лікарів-офтальмологів. Ці системи дозволяють автоматично аналізувати фундус-знімки, ідентифікувати на них характерні патологічні ознаки та класифікувати ступінь діабетичної ретинопатії відповідно до міжнародних стандартів.

Типова архітектура такої системи включає декілька ключових етапів: попередню обробку зображення (наприклад, нормалізацію освітлення, зменшення шуму, усунення артефактів), виділення ROI (областей інтересу), сегментацію структур (судини, макула, диск зорового нерва), а також класифікацію або ранжування за ступенем ураження. Деякі системи також інтегрують модулі для виявлення інших патологій, таких як глаукома або вікова макулодистрофія, що розширює їх функціональність [11].

Яскравим прикладом впровадження є автономна ШІ-система IDx-DR, схвалена FDA. Вона розроблена для використання в умовах первинної медичної допомоги, коли пацієнт без розширення зіниць проходить фундус-фотографію за допомогою спеціальної камери (наприклад, Topcon NW400). Отримане зображення завантажується в хмарну платформу, де ШІ аналізує його протягом хвилин і видає результат — або "діагностична ретинопатія не виявлена, перевірити знову через рік", або "виявлено ретинопатію, необхідна консультація офтальмолога" [3]. Таким чином, система закриває повний діагностичний цикл без потреби в спеціалізованому лікарі на місці.

Ще одним прикладом є система EyeArt, яка теж пройшла клінічну валідацію і наразі використовується у США, Індії та Великій Британії. У великому мультицентровому дослідженні EyeArt показала чутливість 91,3% та специфічність 91,1% при виявленні референтної діабетичної ретинопатії — показників, що порівнюювані з результатами кваліфікованих лікарів [13]. Система підтримує інтеграцію із медичними інформаційними системами (EMR), що важливо для зручної роботи в клініках.

Інші системи з відкритим кодом, як-от RetinaNet або DRInsight, дозволяють адаптувати і вдосконалювати архітектури під конкретні клінічні задачі. Наприклад, RetinaNet поєднує можливості класифікації та сегментації, а також дозволяє експериментувати з attention-механізмами для фокусування на мікроскопічних ураженнях. У публікаціях останніх років демонструється, що моделі, які використовують ensemble-методи (поєднання декількох моделей), досягають точності понад 94% [14].

Важливим аспектом сучасних систем є збереження інтерпретованості — можливості пояснити лікарю або пацієнту, чому система винесла саме таке рішення. Більшість сучасних рішень вбудовують Grad-CAM або аналогічні модулі візуалізації, які відображають теплові карти зонах уваги моделі. Це не тільки підвищує рівень довіри, але й дозволяє лікарям використовувати ШІ як інструмент підтримки прийняття клінічного рішення (CDSS — Clinical Decision Support System) [15].

ЕФЕКТИВНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ДІАГНОСТИЦІ ДІАБЕТИЧНОЇ РЕТИНОПАТІЇ

Ефективність штучного інтелекту (ШІ) у діагностиці діабетичної ретинопатії (ДР) оцінюється за кількома ключовими показниками, зокрема: чутливістю (sensitivity), специфічністю (specificity), точністю (accuracy), часом обробки зображення та здатністю до узагальнення результатів на різні популяції пацієнтів. Дані численних клінічних випробувань та порівняльних досліджень свідчать про те, що сучасні системи ШІ досягають рівня ефективності, співставного з кваліфікованими офтальмологами, а іноді навіть перевершують їх за окремими показниками [7].

У фундаментальному дослідженні команди Google (Gulshan et al., 2016), глибока згортоква нейронна мережа, навчена на понад 128 тисячах фундус-знімків, досягла чутливості 90,3% та специфічності 98,1% у виявленні референтної діабетичної ретинопатії на незалежному датасеті

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

EyePACS-1. Це дозволило авторитетному журналу *JAMA* опублікувати статтю про потенціал ШІ у ранньому скринінгу ДР та підняти питання про масштабованість такого підходу [7].

У подальших незалежних клінічних випробуваннях, таких як випробування автономної системи IDx-DR, зафіксовано чутливість 87,4% і специфічність 89,5% у пацієнтів у реальних умовах первинної медичної допомоги [3]. Це підтверджує, що такі системи здатні функціонувати ефективно навіть поза умовами лабораторій, при цьому забезпечуючи високу діагностичну надійність.

Інше клінічне дослідження, проведене у Великій Британії на мультиетнічній вибірці з понад 300 000 пацієнтів, продемонструвало, що система DeepMind Health (Alphabet) забезпечила точність у 94,5% випадків для виявлення як ДР, так і інших ретинопатій (вікова макулодистрофія, глаукома) [17]. Результати були порівняні з «золотим стандартом» — діагнозами, виставленими групою з восьми консультантів-офтальмологів.

Також важливо відзначити, що системи на основі ШІ здатні аналізувати зображення з високою швидкістю — від 5 до 30 секунд на одне зображення залежно від архітектури моделі та використовуваного обладнання. Це забезпечує можливість масового скринінгу — наприклад, у країнах із високою поширеністю діабету, таких як Індія чи Китай, де ресурси офтальмологів обмежені [10].

Крім технічних показників, клінічна ефективність визначається також здатністю моделі правильно ідентифікувати пацієнтів, яким дійсно потрібно направлення до офтальмолога, та уникати хибнопозитивних результатів, які можуть перевантажити систему охорони здоров'я. У цьому контексті моделі з високою специфічністю мають більшу цінність для практичної охорони здоров'я.

Ще один важливий аспект — загальна узагальнювальність моделей, тобто здатність давати точні результати на зображеннях, зроблених за допомогою різних камер, у різних умовах освітлення та на пацієнтах різного етнічного походження. У багатьох дослідженнях було показано, що без належного fine-tuning моделі можуть втрачати точність на нових датасетах. Наприклад, у дослідженні Li et al. (2019), система ШІ показала точність 93% у Китаї, але лише 87% в Індонезії без перенавчання [14].

У клінічному сенсі, використання ШІ дозволяє зменшити витрати, скоротити черги до офтальмолога та знизити ризик втрати зору у пацієнтів завдяки своєчасному виявленню уражень сітківки. Багато клінік повідомляють про зростання охоплення скринінгом із 30–40% до понад 80% після впровадження автоматизованих систем [19].

ПРОБЛЕМИ ТА ОБМЕЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ДІАГНОСТИЦІ ДІАБЕТИЧНОЇ РЕТИНОПАТІЇ

Незважаючи на значні досягнення в розробці алгоритмів штучного інтелекту (ШІ) для діагностики діабетичної ретинопатії (ДР), існує низка суттєвих проблем і обмежень, які вповільнюють або ускладнюють їх широкомасштабне впровадження в медичну практику. Ці обмеження можна умовно поділити на технічні, клінічні, етичні, правові та соціальні аспекти.

Однією з основних технічних проблем є недостатня узагальнювальна здатність моделей (generalizability). Моделі, які демонструють високі результати на внутрішніх тестових наборах, іноді суттєво втрачають точність при застосуванні до зображень, отриманих з інших джерел — наприклад, з камер іншого виробника, в умовах іншого освітлення або на популяції іншого етнічного походження [20]. Це явище відоме як domain shift, і воно часто потребує перенавчання або додаткової калібровки моделей, що ускладнює масштабування таких рішень.

Ще одна технічна проблема — якість вхідних зображень. ШІ-системи особливо чутливі до нечітких, пересвічених, розмитих або артефактних фундус-знімків. На практиці, понад 10–15% зображень можуть бути непридатними для аналізу, особливо в умовах використання недорогих портативних камер або недостатньо підготовленого персоналу [21]. Деякі моделі навчаються відкидати неякісні зображення, але це також призводить до втрати інформації та ризику пропустити патології.

На клінічному рівні значущим обмеженням є відсутність гнучкості у прийнятті рішень. Більшість нинішніх систем класифікують наявність або відсутність ДР, але не можуть адаптувати свої рекомендації до контексту — наприклад, враховувати інші медичні чинники, супутні хвороби чи індивідуальні особливості пацієнта. Це знижує корисність таких систем у багаточинній клінічній практиці [11].

Також слід відзначити, що більшість моделей поки не підтримують багатомовні інтерфейси, не інтегровані в національні електронні системи охорони здоров'я і не мають повноцінної підтримки локальних протоколів лікування, що обмежує їх використання у країнах, де ШІ ще не регламентовано на державному рівні [23, 26, 27].

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Етичні питання застосування ШІ пов'язані, насамперед, із відсутністю прозорості (black box issue). Навіть якщо система демонструє високу точність, лікар і пацієнт часто не знають, чому саме вона винесла певне рішення. Це викликає недовіру, особливо в умовах, коли йдеться про серйозні клінічні наслідки. Для вирішення цієї проблеми застосовуються інтерпретовані моделі або візуалізаційні підходи на кшталт Grad-CAM, але вони лише частково вирішують проблему [12, 28, 29].

Правові ризики пов'язані з відсутністю чіткої відповідальності у разі помилки. Якщо автономна система винесе хибний негативний результат (не виявить ДР), і пацієнт втратить зір, не зовсім зрозуміло, хто несе юридичну відповідальність — розробник, клініка, яка впровадила систему, чи оператор, який зробив знімок. Такі ситуації вже активно обговорюються в медико-правовій літературі, і вимагають створення нових нормативних механізмів [16, 30, 31].

З соціального боку важливим викликом є довіра пацієнтів та лікарів. Дослідження свідчать, що частина лікарів неохоче приймає рішення, які вони не можуть самостійно інтерпретувати або перевірити. Більше того, пацієнти у деяких культурах вважають неприйнятним отримання діагнозу без безпосереднього спілкування з лікарем [18, 32]. Тому впровадження ШІ супроводжується не лише технічними, а й культурними бар'єрами, які слід враховувати в процесі адаптації систем до локального контексту.

Нарешті, обмеженням залишається також вартість впровадження. Незважаючи на те, що використання ШІ потенційно знижує витрати в довгостроковій перспективі, початкові інвестиції в камери, сервери, програмне забезпечення, навчання персоналу й регуляторне погодження можуть бути високими, особливо для сільських або малозабезпечених клінік [22].

ВИСНОВКИ

Діабетична ретинопатія залишається однією з провідних причин втрати зору у світі, що вимагає своєчасного виявлення та ефективного моніторингу. На цьому тлі штучний інтелект (ШІ) демонструє високий потенціал як інструмент автоматизованої діагностики, здатний суттєво трансформувати офтальмологічну практику. Завдяки алгоритмам глибокого навчання, зокрема згортковим нейронним мережам, стало можливим з високою точністю ідентифікувати патологічні зміни на зображеннях сітківки, що відкриває нові горизонти для масового скринінгу, особливо в умовах обмеженого доступу до офтальмологів.

Дослідження показують, що автономні системи, такі як IDx-DR чи EyeArt, можуть досягати рівня ефективності, співставного з кваліфікованими лікарями. Це підтверджує можливість використання ШІ не лише як допоміжного інструмента, а як повноцінного автономного діагностичного рішення. Однак впровадження таких систем вимагає не лише технічного забезпечення, а й врахування етичних, правових і соціальних аспектів. Проблеми, пов'язані з інтерпретованістю, якістю зображень, доменною адаптацією та правовою відповідальністю, мають бути вирішені на міждисциплінарному рівні.

Незважаючи на існуючі виклики, напрям застосування ШІ в офтальмології є надзвичайно перспективним. Подальші дослідження мають бути зосереджені на підвищенні універсальності моделей, розробці гібридних клінічних протоколів із включенням ШІ, адаптації алгоритмів до реальних клінічних умов та розробці механізмів етичної відповідальності. Інтеграція ШІ в телемедичні платформи, мобільні додатки та національні програми скринінгу може стати ключем до зменшення глобального тягаря діабетичної сліпоти.

Отже, штучний інтелект — це не просто технологічне нововведення, а стратегічний ресурс для модернізації систем охорони зору. За умов належної регуляції, клінічної валідації та суспільного прийняття, такі системи мають потенціал покращити якість діагностики, зробити її більш доступною та персоналізованою, а також зменшити тягар діабетичних ускладнень у глобальному масштабі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. World Health Organization. (2016). Global report on diabetes. *World Health Organization*.
2. Cheung, N., Mitchell, P., & Wong, T. Y. (2010). Diabetic retinopathy. *The Lancet*, 376(9735), 124-136.
3. Abràmoff, M. D., Lavin, P. T., Birch, M., Shah, N., & Folk, J. C. (2018). Pivotal trial of an autonomous AI-based diagnostic system for detection of diabetic retinopathy in primary care offices. *NPJ Digital Medicine*, 1, Article 39.
4. American Diabetes Association. (2023). Standards of Medical Care in Diabetes. *Diabetes Care*, 46(Supplement_1), S1-S290.
5. Early Treatment Diabetic Retinopathy Study Research Group. (1991). Early photocoagulation for diabetic retinopathy. *Ophthalmology*, 98(5), 766-785.

6. Brown, D. M., Schmidt-Erfurth, U., Do, D. V., Holz, F. G., Boyer, D. S., Vitti, R., ... & Heier, J. S. (2015). Intravitreal aflibercept for diabetic macular edema: 100-week results from the VISTA and VIVID studies. *Ophthalmology*, 122(10), 2044–2052.
7. Gulshan, V., Peng, L., Coram, M., Stumpe, M. C., Wu, D., Narayanaswamy, A., ... & Webster, D. R. (2016). Development and Validation of a Deep Learning Algorithm for Detection of Diabetic Retinopathy in Retinal Fundus Photographs. *JAMA*, 316(22), 2402–2410.
8. Leuschen, J. N., Schuman, S. G., Winter, K. P., McCall, M. N., Melia, M., & Friedman, S. M. (2013). Spectral domain optical coherence tomography in diabetic macular edema: a review of the literature. *Retina*, 33(5), 1110–1118.
9. Silva, P. S., Cavallerano, J. D., Sun, J. K., & Aiello, L. M. (2011). Nonmydriatic ultrawide field retinal imaging compared with dilated standard 7-field 35-mm photography and retinal specialist examination for evaluation of diabetic retinopathy. *American Journal of Ophthalmology*, 152(3), 528–536.
10. Rajalakshmi, R., Subashini, R., Anjana, R. M., Mohan, V. (2018). Automated diabetic retinopathy detection in smartphone-based fundus photography using artificial intelligence. *Eye*, 32, 1138–1144.
11. Ting, D. S. W., Pasquale, L. R., Peng, L., Campbell, J. P., Lee, A. Y., Raman, R., ... & Wong, T. Y. (2020). Artificial intelligence and deep learning in ophthalmology. *British Journal of Ophthalmology*, 104(2), 167–175.
12. Holzinger, A., Biemann, C., Pattichis, C. S., & Kell, D. B. (2017). What do we need to build explainable AI systems for the medical domain? *Review of the state of the art and current challenges. arXiv preprint*, arXiv:1712.09923.
13. [13] Maa, A. Y., Bailey, S. T., et al. (2020). Validation of Artificial Intelligence-based Screening for Diabetic Retinopathy. *JAMA Network Open*, 3(3), e200783.
14. [14] Li, Z., He, Y., Keel, S., Meng, W., Chang, R. T., & He, M. (2019). Efficacy of a deep learning system for detecting diabetic retinopathy in community-based primary care settings. *NPJ Digital Medicine*, 2, 33
15. Holzinger, A., Carrington, A., & Müller, H. (2020). Measuring the quality of explanations: The system causability scale (SCS). *KI - Künstliche Intelligenz*, 34, 193–198.
16. Price, W. N., & Cohen, I. G. (2019). Privacy in the age of medical big data. *Nature Medicine*, 25(1), 37–43.
17. De Fauw, J., Ledsam, J. R., Romera-Paredes, B., et al. (2018). Clinically applicable deep learning for diagnosis and referral in retinal disease. *Nature Medicine*, 24(9), 1342–1350.
18. Blease, C., Kaptchuk, T. J., Bernstein, M. H., et al. (2019). Artificial intelligence and the future of primary care: Exploratory qualitative study of UK general practitioners' views. *Journal of Medical Internet Research*, 21(3), e12802.
19. Cuadros, J., & Bresnick, G. (2009). EyePACS: an adaptable telemedicine system for diabetic retinopathy screening. *Journal of Diabetes Science and Technology*, 3(3), 509–516.
20. Beede, E., Baylor, E., Hersch, F., et al. (2020). A Human-Centered Evaluation of a Deep Learning System Deployed in Clinics for the Detection of Diabetic Retinopathy. *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1–12.
21. Saha, S. K., Fernando, B., Cuadros, J., & Kanagasingam, Y. (2019). Automated Quality Assessment of Fundus Images for Diabetic Retinopathy Screening: A Deep Learning Approach. *International Journal of Medical Informatics*, 124, 105–112.
22. Reddy, R. K., Dwarakanathan, S., Kanagasingam, Y., & Yogesan, K. (2022). Challenges in AI implementation in eye care services in low-income countries. *Global Health Action*, 15(1), 2022782.
23. van der Heijden, A. A., Abramoff, M. D., Verbraak, F. D., et al. (2018). Validation of Automated Screening for Referable Diabetic Retinopathy With the IDx-DR Device in the Hoorn Diabetes Care System. *Acta Ophthalmologica*, 96(1), 63–68.
24. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
25. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.
26. Highly linear Microelectronic Sensors Signal Converters Based on Push-Pull Amplifier Circuits / edited by Waldemar Wojcik and Sergii Pavlov, Monograph, (2022) NR 181, Lublin, Comitet Inzynierii Srodowiska PAN, 283 Pages. ISBN 978-83-63714-80-2
27. Pavlov Sergii, Avrunin Oleg, Hrushko Oleksandr, and etc. (2021). System of three-dimensional human face images formation for plastic and reconstructive medicine // Teaching and subjects on bio-medical engineering Approaches and experiences from the BIOART-project Peter Arras and David Luengo

- (Eds.), Corresponding authors, Peter Arras and David Luengo. Printed by Acco cv, Leuven (Belgium). - 22 P. ISBN: 978-94-641-4245-7.
28. Pavlov S.V., Avrunin O.G., etc. (2019). Intellectual technologies in medical diagnosis, treatment and rehabilitation: monograph / [S. In edited by S. Pavlov, O. Avrunin. - Vinnytsia: PP "TD "Edelweiss and K", 260 p. ISBN 978-617-7237-59-3.
29. Romanyuk, O., Zavalniuk, Y., Pavlov, S., etc. (2023). New surface reflectance model with the combination of two cubic functions usage, Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska, , 13(3), pp. 101–10
30. Kukharchuk, Vasyl V., Sergii V. Pavlov, Volodymyr S. Holodiuk, Valery E. Kryvonosov, Krzysztof Skorupski, Assel Mussabekova, and Gaini Karnakova. (2022). "Information Conversion in Measuring Channels with Optoelectronic Sensors" Sensors 22, no. 1: 271. <https://doi.org/10.3390/s22010271>.
31. Vasyl V. Kukharchuk, Sergii V. Pavlov, Samoil Sh. Katsyv, and etc. (2021). Transient analysis in 1st order electrical circuits in violation of commutation laws", Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 97 NR 9/2021, p. 26-29, doi:10.15199/48.2021.09.05.
32. Pavlov S.V, Petruk V.G., Kolesnik P.F. (2007). Photoplethysmographic technologies of the cardiovascular control: monography, Vinnitsa: Universum-Vinnitsa, 254 p

Надійшла до редакції 17.04.25 р.

КОРНИЛЕНКО ОЛЕКСАНДР СЕРГІЙОВИЧ – аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, 21021, Україна, **e-mail: okornilenko@vntu.edu.ua**

КАРАСЬ ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ – PhD, старший викладач кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, Україна, **e-mail: karas2014.O.11@gmail.com**

OLEKSANDR KORNILENKO, OLEKSANDR KARAS

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR AUTOMATED INTERPRETATION OF OPTICAL RETINAL IMAGES IN DIABETIC RETINOPATHY

Vinnytsia National Technical University

УДК 004.93:612.744:616-07

Т.В. ЖЕМЧУЖКІНА

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТОЧНОСТІ КЛАСИФІКАЦІЇ ЕЛЕКТРОМІОГРАФІЧНИХ СИГНАЛІВ ЗА ОЗНАКАМИ ГРАФІКА РІЗНИЦЬ ДРУГОГО ПОРЯДКУ ДЛЯ ДИФЕРЕНЦІЮВАННЯ ТИПІВ БОЛЮ В ПОПЕРЕКУ

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine, tatyana.zhemchuzhkina@nure.ua

Анотація. Біль у попереку є основною причиною інвалідності. З патофізіологічної точки зору розрізняють функціональний і дисфункціональний типи болю. Функціональний біль має визначену органічну причину у вигляді прямого пошкодження тканин і активації периферичних больових рецепторів або пошкодження, яке впливає на соматосенсорну систему. Дисфункціональний біль формується внаслідок нейродинамічних порушень в центральній нервовій системі. Як правило, при обстеженні пацієнтів з дисфункціональним болем не вдається виявити органічні захворювання, які могли б пояснити виникнення больового синдрому. Дана робота присвячена вивченню можливостей класифікаційних методів диференціації функціонального та дисфункціонального болю за показниками графіка різниць другого порядку електроміографічного сигналу. Електроміографічні сигнали мають надзвичайно складні характеристики, що нагадують хаотичні процеси в природі. Графік різниць другого порядку дає змогу аналізувати ступінь варіабельності або хаотичності в наборі електроміографічних даних.

Ключові слова: біль у попереку, графік різниць другого порядку, електроміографія, класифікаційний ансамбль, класифікація, метод k -найближчих сусідів, нейронна мережа, теорія хаосу.

Abstract. Low back pain is the main cause of disability. From the pathophysiological point of view, there are functional and dysfunctional types of pain. Functional pain has a specific organic cause in the form of direct tissue damage and activation of peripheral pain receptors or damage that affects the somatosensory system. Dysfunctional pain is formed as a result of neurodynamic disorders in the central nervous system. As a rule, when examining patients with dysfunctional pain, it is not possible to identify organic diseases that could explain the occurrence of the pain syndrome. This work is devoted to studying the possibilities of classification methods for differentiating functional and dysfunctional pain based on the second-order difference plot of the electromyographic signal. Electromyographic signals have extremely complex characteristics that resemble chaotic processes in nature. The second-order difference plot allows to analyze the degree of variability or chaos in a set of electromyographic data.

Keywords: chaos theory, classification, classification ensemble, electromyography, k -nearest neighbors, low back pain, neural network, second order difference plot.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-217-226

ВСТУП

Біль у попереку часто називають такими термінами, як люмбаго або люмбалгія. Люмбаго – це напад гострого болю в попереку, який зазвичай пов'язаний з переохолодженням та фізичним навантаженням. Люмбаго зустрічається у багатьох людей і часто є причиною тимчасової непрацездатності. Часто причиною люмбаго можуть бути спортивні травми або розтягнення зв'язок, але іноді фактор, що провокує виникнення болю, залишається невідомим. Біль у попереку може з'являтися гостро і поступово прогресувати протягом дня. Також можливо викривлення хребта (анталгічний сколіоз) в результаті м'язового спазму. Сам біль може бути зумовлений м'язовим спазмом, який, у свою чергу, пов'язаний з іншими причинами.

Це може бути перенапруження або розтягнення зв'язок, спортивні травми, грижа міжхребцевого диска, спондилоартроз (спондильоз), захворювання нирок (інфекція або камені в нирках). Іноді пацієнт точно визначає причинно-наслідковий зв'язок між появою нездужання та стресом, переохолодженням, але часто біль з'являється без очевидних причин. Іноді біль у попереку може виникати навіть після чхання, нахилу або взування взуття. Цьому можуть сприяти деформуючі захворювання хребта, такі як сколіоз.

На відміну від люмбаго, термін люмбалгія позначає біль, який не є гострим, а підгострим або хронічним. Як правило, біль при люмбалгії з'являється поступово протягом кількох днів. Біль також може виникати вранці та зменшуватися при фізичній активності. Люмбалгія характеризується посиленням болю під час тривалих статичних навантажень (сидіння, незручне положення тіла). Також для люмбалгії характерно те, що біль зменшується в положенні лежачи на спині в певній позі. Пацієнтам з люмбалгією важко виконувати звичайні дії, такі як прання або взування, через м'язовий спазм. Через захворювання спостерігається зменшення діапазону рухів тіла (нахили вперед або, меншою мірою, нахили вбік чи розгинання). Через больовий синдром пацієнту часто доводиться змінювати положення, коли необхідно сісти або встати. На відміну від люмбаго, м'язовий спазм менш виражений і, як правило, не охоплює всю нижню частину спини, причому часто спостерігаються ознаки переважання спазму з одного боку.

З патофізіологічної точки зору розрізняють ноцицептивний, нейропатичний та дисфункціональний типи болю. Ноцицептивний біль виникає при прямому пошкодженні тканин та активації периферичних больових рецепторів. Нейропатичний біль розвивається при пошкодженні, яке вражає соматосенсорну систему. Дисфункціональний біль формується внаслідок нейродинамічних порушень у центральній нервовій системі. Як правило, при обстеженні пацієнтів з дисфункціональним болем не вдається виявити органічні захворювання, які могли б пояснити виникнення больового синдрому. Основними факторами, що сприяють розвитку дисфункціонального болю, є психологічні, соціальні проблеми та емоційний стрес. Крім того, існує супутній біль, типовим прикладом якого є біль у спині.

Існує багато захворювань, що проявляються болем у спині: дегенеративно-дистрофічні зміни хребта, дифузні ураження сполучної тканини, захворювання внутрішніх органів тощо. Ця патологія є мультидисциплінарною проблемою і повинна розглядатися різними спеціалістами: неврологами, травматологами, ортопедами, ревматологами. У переважній більшості випадків причинами болю в спині є дегенеративно-дистрофічні зміни хребта. Важливу роль відіграють недостатня фізична активність, надмірна вага, переохолодження, статичне навантаження та конституційні особливості. Нестабільність рухових сегментів хребців, зміни міжхребцевих дисків, зв'язкового апарату, м'язів, фасцій, сухожилів призводять до «механічного» подразнення периферичних рецепторів та виникнення ноцицептивного болю.

З точки зору неврологів, для визначення тактики ведення пацієнта з болем у спині вкрай необхідно визначити топічний діагноз та, по можливості, встановити етіологію больового синдрому.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ДОСЛІДЖЕНЬ

Поверхнева електроміографія (ЕМГ) – неінвазивний метод дослідження біоелектричної активності м'язів у стані спокою та різних навантажень. При поверхневій електроміографії можна виявити деякі патологічні форми електричної активності м'язів, характерні для ураження передніх рогів спинного мозку; парез, викликаний пошкодженням рухових нейронів; пірамідні ураження; паркінсонічний синдром; неврози; хорея, атетоз; патологічний тремор та ін.

На сьогодні запропоновано велику кількість різноманітних методів обробки та аналізу електроміографічного сигналу з метою отримання кількісних інформативних показників стану пацієнта [1] – [4]. Крім того, пропонується розширити можливості традиційного електроміографічного реєстратора для об'єктивізації оцінки результатів електроміографії [5], [6].

Задачею даної роботи є аналіз точності класифікації ЕМГ-сигналу за типом болю (дисфункціональний, тобто без виявленої органічної патології, або функціональний, а саме вертебрологічний, тобто спричинений дегенеративними захворюваннями хребта на основі) за ознаками графіка різниць другого порядку електроміографічного сигналу методами нейронної мережі, k -найближчих сусідів, ймовірнісної нейронної мережі та ансамблевого класифікатора.

1. МЕТОДИ

Для діагностики стану опорно-рухового апарату поряд з магнітно-резонансною томографією, комп'ютерною томографією, рентгенографією та ультразвуковою діагностикою використовується електроміографія. ЕМГ можна використовувати не тільки для діагностики захворювань, а й для оцінки тяжкості захворювання, ступеня ураження, ефективності лікування та реабілітації. Реєстрація біопотенціалів при електроміографії може проводитися за допомогою різних електродів. Поверхнева електроміографія використовується в тих випадках, коли необхідно зареєструвати біопотенціали зі значної ділянки м'язів. Голчасті електроди також можна використовувати для реєстрації ЕМГ. Вони вводяться безпосередньо в м'яз і можна оцінити біопотенціал окремих одиниць м'язової тканини. Перевагою поверхневої електроміографії є атравматичність, відсутність ризику інфікування, зручність поводження з електродами. Безболісність дослідження не накладає обмежень на кількість досліджуваних м'язів за раз, робить цей метод кращим при обстеженні дітей, а також для фізіологічного контролю в спортивній медицині або при дослідженні складних рухів.

Основними методами аналізу електроміографічних сигналів є методи спектрального та кореляційного аналізу [1] – [4]. Проте ці методи не враховують нестационарність електроміографічного сигналу [7], що не дозволяє повною мірою проаналізувати динаміку параметрів системи протягом усього періоду дослідження.

А. Методи теорії хаосу

Біомедичні сигнали, отримані на основі електрофізіологічних досліджень загалом, і електроміографічні сигнали зокрема, мають надзвичайно складні характеристики, що за своєю природою нагадують хаотичний процес. Виходячи з цього, окрім традиційних методів аналізу електроміографічних сигналів, пропонується використовувати методи теорії хаосу для аналізу електроміографічних сигналів [8] – [14].

Теорія динамічних систем є важливою частиною нелінійної обробки сигналів. Динамічна система – це система, стан якої змінюється з часом. При розгляді поведінки системи з використанням неперервного часу система подається диференціальними рівняннями. Динаміка дискретної в часі системи визначається її можливими станами в багатовимірному векторному просторі, який називається простором станів або фазовим простором. Переходи між станами описуються векторами, і ці вектори утворюють траєкторію, яка описує еволюцію системи у часі.

Під час функціонування системи вектор змінних стану, змінюючись у часі, описує певну траєкторію у фазовому просторі. Характер фазових траєкторій відображає загальні якісні особливості поведінки системи в часі. Існує так званий метод затримки, який можна використовувати для реконструкції фазового портрета системи, інформація про який представлена у вигляді дискретного ряду значень однієї змінної. Аналіз фазового портрета дозволяє визначити тип системної динаміки. Для цього шукають аттрактор. Найпростішим аттрактором є нерухома точка. Такий аттрактор описує систему, яка еволюціонує в один єдиний стан. Іншим варіантом аттрактора є граничний цикл. Він відповідає системі, що прагне до періодичного стану. На фазовій площині поблизу граничного циклу траєкторії описують періодичні криві – кола, еліпси або тори. Третій тип аттрактора називається «дивним аттрактором». Дивний аттрактор описує хаотичну систему.

Для динамічних систем загальноприйнятим представленням динаміки процесу в часі є побудова фазового портрета. Для кількісного визначення самоподібності процесів використовується графік Пуанкаре, який є різновидом рекурентного графіка. Графіки Пуанкаре можна використовувати, щоб відрізнити хаос від випадковості шляхом вбудовування набору даних у багатовимірний простір станів.

Для дискретного часового ряду x графік Пуанкаре у своїй найпростішій формі є набором точок із координатами $(x(i), x(i+1))$, коли кожне наступне значення $x(i+1)$ будується на графіку проти його поточного значення $x(i)$. Отриманий графік є мірою ступеня хаосу в системі. Такий підхід дозволяє виявити кореляцію між послідовними значеннями в часовому ряді.

Якщо ми побудуємо графік різниці $(x(i+2) - x(i+1))$ проти різниці $(x(i+1) - x(i))$, ми отримаємо інший нелінійний метод – графік різниці другого порядку (second order difference plot, SODP). Такий підхід дає змогу з'ясувати кореляцію між послідовними значеннями швидкості в часовому ряді, тобто проаналізувати ступінь варіабельності або хаотичності в наборі даних.

Для аналізу ЕМГ можна використовувати різні методи нелінійного аналізу, такі як аналіз ентропії [10], аналіз фрактальної розмірності; побудова фазових портретів та аналіз їх параметрів [8], [9].

Реконструкція фазового простору вимагає попереднього визначення вбудованої розмірності та часу затримки на основі взаємної інформації або автокореляційної функції часового ряду.

У порівнянні з реконструкцією фазового простору, SODP будується без трудомісткого попереднього обчислення.

В. Графік різниць другого порядку та ознаки, отримані з нього

Позначимо координати SODP для часового ряду значень сигналу ЕМГ $x(i)$ як:

$$X(i) = x(i+1) - x(i);$$

$$Y(i) = x(i+2) - x(i+1);$$

Значення $X(i)$ та $Y(i)$ нормуються відносно максимального абсолютного значення. Результат побудови SODP для ЕМГ-сигналу для здорової особи без скарг на біль у попереку наведено на рис. 1.

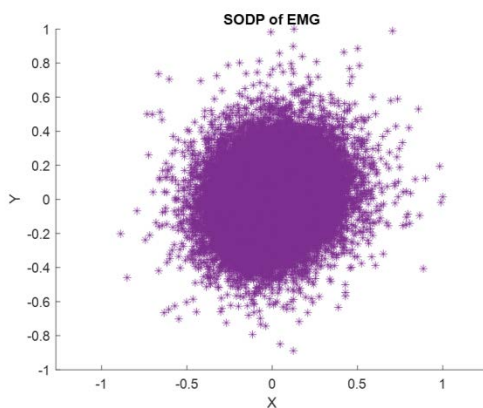


Рисунок 1 – SODP для ЕМГ-сигналу здорової людини без скарг на біль у попереку

Автори [15] – [17], які досліджували можливості SODP для аналізу електрокардіографічних та електроенцефалографічних сигналів, пропонують обчислювати набір кількісних ознак з отриманого графіка.

SODP займає чотири квадранти на координатній площині (рис. 2): квадрант I (+/+); квадрант II (+/-); квадрант III (-/-); квадрант IV (-/+). Кожен квадрант демонструє динаміку певного типу: I – переважання підвищеної електричної активності; III – переважання зниження активності; II і IV – балансування змін діяльності. Щоб визначити переважаючий тип динаміки системи, підраховується кількість подій для кожного квадранта.

Крім того, пропонується розділити весь простір на кругові області радіусом r навколо початку координат і підрахувати кількість точок, що потрапляють у задану область. Цей показник називається мірою центральної тенденції (Central Trend Measure, *CTM*). *CTM* використовується для оцінки ступеня варіабельності на графіку різниць другого порядку. Низьке значення *CTM* вказує на те, що дані розподілені на великій площі. *CTM* визначається наступним чином:

$$CTM = \sum_{i=1}^n q(i),$$

$$\text{де } q(i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \sqrt{X(i)^2 + Y(i)^2} \leq r; \\ 0, & \text{інакше;} \end{cases}$$

r – радіус *CTM*.

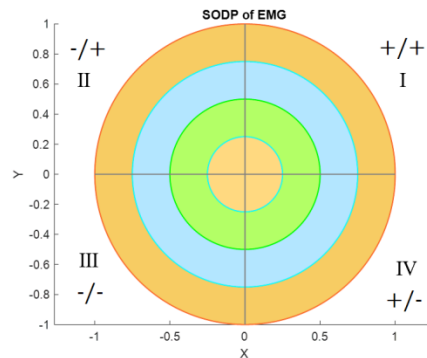


Рисунок 2 – Области SODP, які використовуються для аналізу *CTM*

Для аналізу ЕМГ в роботі використовувалися значення радіуса r 1/4, 1/2, 3/4 та 1 (рис. 2). Діапазон зміни значень SODP на обох осях становить від -1 до 1 , оскільки дані попередньо нормовані.

На рис. 1 показано, що SODP є еліптичною хмарою точок із центром у початку координат. Тому в якості кількісних ознак для аналізу SODP використовуються характеристики еліпса: довжини осей і його площа. Для апроксимації еліпса та вимірювання дисперсії та розкиду точок уздовж малої та великої осей використовуються стандартні дескриптори – лінії, розташовані під кутами 45° ($STD1$) та 135° ($STD2$) (рис. 3):

$$STD1 = \sqrt{\text{Var}((X(i) - Y(i)) / \sqrt{2})};$$

$$STD2 = \sqrt{\text{Var}((X(i) + Y(i)) / \sqrt{2})}.$$

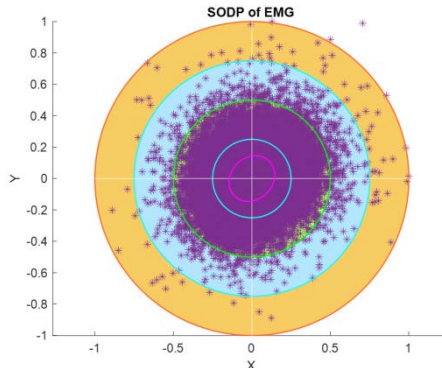


Рисунок 3 – Еліпс, побудований для хмари точок SODP

Площа еліпса обчислюється за значеннями довжин осей:

$$STD = \pi \cdot STD1 \cdot STD2.$$

Найкоротша відстань від кожної точки до великої осі, тобто лінії 45° , обчислюється для оцінки розкиду точок від лінії $y = x$. Коротші відстані свідчать про зниження активності м'язів. Сума найкоротших відстаней від кожної точки до лінії 45° (sum of the shortest distances, *SSHD*) визначається наступним чином:

$$SSHD = \sum_{i=1}^n |X(i) - Y(i)| / \sqrt{2}.$$

Кути між послідовними векторами можуть характеризувати зміну ЕМГ-сигналу в часі для отримання кількісної характеристики часової динаміки сигналу. Сума кутів між послідовними векторами (sum of angles between successive vectors, *SAV*) обчислюється наступним чином:

$$SAV = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{X(i)X(i+1) + Y(i)Y(i+1)}{\sqrt{X(i)^2 + Y(i)^2} + \sqrt{X(i+1)^2 + Y(i+1)^2}}.$$

Оскільки в деяких випадках вектори, отримані для послідовних точок, можуть мати однакові кути при різних значеннях довжини векторів, площі трикутників, побудованих трьома послідовними точками, можна використовувати як додатковий параметр.

Три послідовні точки SODP утворюють трикутник. Якщо кут вектора і площа трикутника дуже малі, то відстань між сусідніми точками буде малою, що свідчить про зменшення динаміки системи. Сума площ трикутників з використанням послідовних векторів (sum of the triangle areas, STA) обчислюється наступним чином:

$$STA = \sum_{i=1}^{n-2} \frac{1}{2} \left| \det \begin{bmatrix} X(i) & X(i+1) & X(i+2) \\ Y(i) & Y(i+1) & Y(i+2) \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \right|.$$

Для кількісного визначення самоподібності SODP визначають суму відстаней між центроїдами послідовних трикутників (sum of centroid-to-centroid distances of successive triangles, SCC). Центроїди можна отримати шляхом обчислення середніх координат ($X_c(i)$, $Y_c(i)$) для трьох послідовних точок ($X(i)$, $Y(i)$), ($X(i+1)$, $Y(i+1)$) та ($X(i+2)$, $Y(i+2)$); потім обчислюється відстань між центроїдами двох послідовних трикутників. SCC визначається таким чином:

$$SCC = \sum_{i=1}^{n-2} \sqrt{(X_c(i+1) - X_c(i))^2 + (Y_c(i+1) - Y_c(i))^2},$$

де $X_c(i) = (X(i) + X(i+1) + X(i+2))/3$;

$Y_c(i) = (Y(i) + Y(i+1) + Y(i+2))/3$.

Усі параметри, що містять суми, нормалізуються на загальну кількість відліків сигналу n , параметри *CTM* подаються у відсотках від загальної кількості відліків.

В [13] було проаналізовано ЕМГ-сигнали, зареєстровані з поперекового відділу при обстеженні довгого м'яза-розгинача тулуба на рівні поперекового відділу хребта (L4-L5) у здорових осіб без скарг на біль у попереку (1 група) та осіб зі сколіозом (2 група). Відповідно до описаного вище методу було побудовано SODP та розраховано 25 ознак. В результаті статистичного аналізу в [13] було отримано, що більшість характеристик мають достовірну різницю для двох досліджуваних груп, тобто можуть бути використані для диференціації станів за даними ЕМГ-сигналу.

С. Методи класифікації

В даній роботі проводиться аналіз можливостей чотирьох класифікаторів для розрізнення функціонального та дисфункціонального болю у попереку по 25 ознакам SODP.

В якості класифікаторів обрано повнозв'язну нейронну мережа, метод k -найближчих сусідів, ймовірнісну нейронну мережу та ансамблевий метод класифікації.

Метод класифікації на основі штучної нейронної мережі передбачає побудову повнозв'язної багатoshарової нейронної мережі прямого поширення (feedforward neural network), яка оптимізується для задачі багатокласової кластеризації. Архітектура мережі складається з одного прихованого шару, що містить 10 нейронів (розмір прихованого шару обрано експериментально для кращої точності), із функцією активації ReLU (Rectified Linear Unit), яка виконує порогову операцію для кожного елемента входу, де будь-яке значення менше нуля встановлюється на нуль, тобто:

$$f(x) = \begin{cases} x, & x \geq 0; \\ 0, & x < 0. \end{cases}$$

Вихідний повнозв'язний шар має 2 виходи відповідно до кількості груп, на які класифікуємо вхід. До вихідного шару застосовується функція активації softmax. Функція приймає значення кожного входу x_i і повертає наступне:

$$f(x_i) = \frac{\exp(x_i)}{\sum_{j=1}^K \exp(x_j)},$$

де K – кількість класів у змінній відповіді.

Перед навчанням мережі було виконано стандартизацію вхідних ознак, що забезпечує нульове середнє значення та одиничне стандартне відхилення для кожного з параметрів. Навчання здійснювалося з використанням стохастичного градієнтного спуску.

Було використано також метод класифікації на основі алгоритму k найближчих сусідів (k -nearest neighbors, KNN), який належить до нерегуляризованих (instance-based) методів навчання з учителем. Для кожного нового спостереження прогноз класу здійснюється на основі аналізу найближчих навчальних зразків у просторі ознак. У реалізованому підході кількість врахованих сусідів становила 6, при цьому вплив кожного з них на прийняття рішення зважувався обернено пропорційно до евклідової відстані до цього сусіда. Такий механізм вагового врахування дозволяє підвищити точність класифікації, оскільки ближчі до об'єкта приклади мають більший вплив на остаточне рішення. Перед класифікацією було проведено стандартизацію ознак, що забезпечує однаковий масштаб усіх вхідних змінних та усуває вплив відмінностей у їх числових діапазонах. Задача виконувалася в бінарній постановці з двома фіксованими класами.

У дослідженні було використано метод класифікації на основі ймовірнісної нейронної мережі (probabilistic neural network, PNN), яка належить до класу мереж прямого поширення з фіксованою архітектурою та реалізує принцип статистичної оцінки щільності ймовірності. Навчальна вибірка була попередньо нормалізована для забезпечення нульового середнього та одиничного стандартного відхилення кожної ознаки з метою усунення відмінностей у масштабах ознак. Класові мітки цільового вектора були подані у вигляді бінаризованої матриці-індикатора (one-hot encoding), придатної для подання вхідних сигналів у мережу.

Ймовірнісна нейронна мережа формує кожен вихідний клас як суму ядерно зважених оцінок щільності, побудованих навколо кожного елемента навчальної множини відповідного класу. Вибір класу для нового зразка здійснюється за принципом максимальної апостеріорної ймовірності. Вплив кожного навчального вектора визначається гауссовим ядром з фіксованим параметром ширини розсіювання (spread), який було встановлено на рівні 0.1.

Також було застосовано ансамблевий метод класифікації на основі бутстрап-агрегування (bootstrap aggregating), що передбачає побудову множини базових класифікаторів, кожен з яких навчається на випадково сформованій підмножині навчальних даних із поверненням. Остаточне рішення формується шляхом агрегування відповідей окремих моделей, що забезпечує зменшення дисперсії, підвищення стійкості до перенавчання та поліпшення загальної здатності до узагальнення. Задача класифікації виконувалась у двокласовій постановці з зазначенням міток класів.

РЕЗУЛЬТАТИ

Електроміографічні сигнали реєстрували з поверхневих електродів на рівні п'ятого поперекового хребця тіла людини. При аналізі використовували розраховані 25 показників SODP електроміограм двох груп пацієнтів:

1. умовно здорові зі скаргами на біль у попереку без виявленої органічної патології (дисфункціональний біль) (38 міограм – навчальна вибірка; 30 міограм – тестова вибірка);

2) хворі на функціональний біль із дегенеративними захворюваннями хребта (вертебологічні хворі) (38 міограм – навчальна вибірка; 24 міограми – тестова вибірка).

Навчання виконувалося на виборці з рівною кількістю міограм в кожному з двох класів для запобігання дисбалансу.

Тривалість всіх аналізованих електроміограм – 60 секунд. Усі сигнали були відфільтровані смуговим фільтром Баттерворта (10–500) Гц і проріджені до частоти дискретизації 1000 Гц.

Результати точності, F1-міри (F1-score) та AUC (площа під ROC-кривою) для чотирьох протестованих класифікаторів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати точності, F1-міри (F1-score) та AUC (площа під ROC-кривою) для чотирьох протестованих класифікаторів

Метод	Точність	F1-score	AUC
Ансамблевий класифікатор (ENS)	88,89%	0,91	0,99
Повнозв'язна нейронна мережа (NN)	88,89%	0,91	0,93
<i>k</i> -найближчих сусідів (KNN)	92,59%	0,94	1,00
Ймовірнісна нейронна мережа (PNN)	87,04%	0,90	0,85

Діаграми помилок класифікації для істинних міток (true classes) і прогнозованих міток (predicted classes) для результатів застосування чотирьох класифікаторів до тестового набору показано на рис. 4. ROC-криві для чотирьох класифікаторів, застосованих до тестового набору, показано на рис. 5.

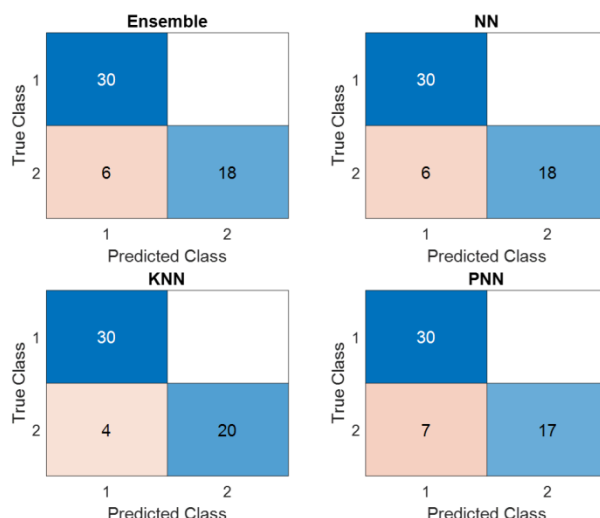


Рисунок 4 – Матриці помилок класифікації для чотирьох класифікаторів: ENS – ансамблевий класифікатор, NN – повнозв'язна нейронна мережа, KNN – *k*-найближчих сусідів, PNN – ймовірнісна нейронна мережа

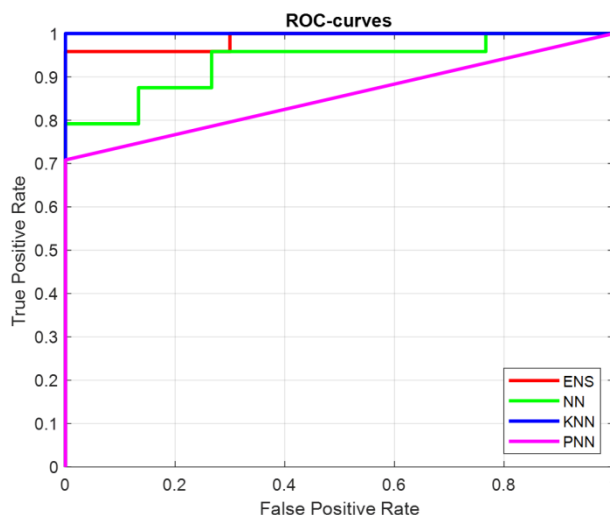


Рисунок 5 – ROC-криві для чотирьох класифікаторів: ENS – ансамблевий класифікатор, NN – повнозв'язна нейронна мережа, KNN – *k*-найближчих сусідів, PNN – ймовірнісна нейронна мережа

Аналіз результатів (табл. 1, рис. 4-5) свідчить, що найвищу здатність до узагальнення продемонстрував алгоритм *k*-найближчих сусідів: точність 92,59 %, F1-міра 0,94 і AUC=1,00.

Ансамблевий класифікатор і повнозв'язна нейронна мережа показали однакову точність (88,89 %) та F1-міру (0,91), проте ансамбль кращий за нейромережу за площею під ROC-кривою (0,99 проти 0,93), що вказує на кращу стабільність при зміні порога прийняття рішення. Ймовірна нейронна мережа показала найгірші результати. Отже, локальний характер прийняття рішень у KNN виявився найбільш придатним для розділення двох заданих діагностичних класів, тоді як PNN продемонструвала найнижчу якість класифікації.

ВИСНОВКИ

У даному дослідженні було проведено порівняльний аналіз чотирьох методів класифікації для задачі диференціації типу болю в попереку (функціонального та дисфункціонального) за ознаками, отриманими з графіка різниці другого порядку (SODP), побудованого на основі електроміографічного сигналу. Усі моделі навчалися на 25 параметрах, отриманих з SODP.

Результати експериментів продемонстрували перевагу алгоритму k -найближчих сусідів, який мав найвищі показники точності, F1-міри та площі під ROC-кривою (AUC), що вказує на його високу здатність до узагальнення та ефективне розрізнення між класами. Ансамблевий класифікатор та повнозв'язна нейронна мережа показали зіставні результати з незначною перевагою ансамблю за стабільністю класифікації. Ймовірна нейронна мережа, незважаючи на високу точність на тренувальній вибірці, продемонструвала найгірші результати на тестових даних.

Таким чином, використання параметрів SODP у поєднанні з методом k -найближчих сусідів є доцільним підходом для автоматизованої класифікації типу болю за електроміографічними даними, що є перспективним для підтримки діагностики в клінічній практиці.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. T.V. Zhemchuzhkina, T.V. Nosova, Ya.V. Nosova, A.V. Gubanov, D.R. Duplij, I.V. Kotul'skij, "Statistical analysis of the spectral characteristics of the EMG signal in order to differentiate lumbar pain," *Bionika intellekta*. 2015; 2(85): pp. 105-108.
2. T. Zhemchuzhkina, T. Nosova, "Analysis of the dynamics of statistical and spectral indicators of electromyograms of the lumbar region," Scientific Collection "InterConf", (96): with the Proceedings of the 6th International Scientific and Practical Conference *Scientific Community: Interdisciplinary Research* (January 26-28, 2022). Hamburg, Germany: Busse Verlag GmbH, 2022. 1206 p., pp. 683-686.
3. T. Zhemchuzhkina, I. Kurochkin, "Spectral characteristics of the electromyographic signal to assess the quality of therapy and rehabilitation in patients with low back pain," *International scientific journal «Grail of Science»*, № 29, 2023. pp. 322-331; DOI 10.36074/grail-of-science.07.07.2023.055.
4. T. Zhemchuzhkina and I. Kurochkin, "Classification of Functional and Dysfunctional Low Back Pain by Spectral Indicators of Electromyogram," *2023 IEEE 18th International Conference on Computer Science and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/CSIT61576.2023.10324058.
5. T. Zhemchuzhkina, "Second Order Difference Plot as a Tool for Low Back Pain Differentiation by Electromyographic Signals," *2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312961.
6. M. E. Cohen, D. L. Hudson and P. C. Deedwania, "Applying continuous chaotic modeling to cardiac signal analysis," *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, vol. 15, no. 5, pp. 97-102, Sept.-Oct. 1996, doi: 10.1109/51.537065.
7. Yayik , E. Yildirim , Y. Kutlu and S. Yildirim, "Epileptic State Detection: Pre-ictal, Inter-ictal, Ictal," *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 14-18, Jan. 2015, doi:10.18201/ijisae.14531.
8. R. Wang, H. Wang, L. Shi, C. Han, Y. Che, "Epileptic Seizure Detection Using Geometric Features Extracted from SODP Shape of EEG Signals and AsyLnCPSO-GA," *Entropy* 2022, 24, 1540. <https://doi.org/10.3390/e24111540>.
9. Detection of circulating tumour cells in peripheral blood with an automated scanning fluorescence micro-scope / T. Ntouroipi, S. Ashraf, S. McGregor [et al.] // *British Journal of Cancer*. – 2008. – Vol. 99, No. 5. – P. 789–795.

10. Detection and analysis of cancer cells in blood and bone marrow using a rare event imaging system / S. Kraeft, R. Sutherland, L. Gravelin [et al.] // Clinical Cancer Research: An Official Journal of the American Association for Cancer Research. – 2000. – Vol. 6, No. 2. – P. 434–442
11. Kozhem'yako V. P. Optical-electronic methods and tools for processing and analyzing biomedical images [monograph] / V. P. Kozhem'yako, S. V. Pavlov, K. I. Stanchuk. – Vinnytsia: UNIVERSUM, 2006 – 203 p.
12. Maragos, P., Sofou, A., Stamou, G.B. et al. Image Analysis of Soil Micromorphology: Feature Extraction, Segmentation, and Quality Inference. EURASIP J. Adv. Signal Process. 2004, 356937 (2004).
13. Pavlov S. V. Information Technology in Medical Diagnostics //Waldemar Wójcik, Andrzej Smolarz, July 11, 2017 by CRC Press - 210 Pages.
14. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. Information Technology in Medical Diagnostics II. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.
15. M. Banham and A. Katsaggelos, "Digital image restoration", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 14, no. 2, pp. 24-41, 1997.
16. Tymkovych, O. Gryshkov, O. Avrunin, K. Selivanova, Y. Nosova, V. Mutsenko, et al., "Application of SOFA framework for physics-based simulation of deformable human anatomy of nasal cavity", IFMBE Proceedings, vol. 80, pp. 112-120, 2021.
17. M. Tymkovych, O. Gryshkov, K. Selivanova, V. Mutsenko, O. Avrunin and B. Glasmacher, "Application of artificial neural networks for analysis of ice recrystallization process for cryopreservation", *8th European Medical and Biological Engineering Conference (EMBEC 2021), pp. 102-111, Nov. 29 - Dec. 3, 2021.computer vision techniques," Przegląd Elektrotechniczny, 9 30 –33 (2021) DOI[10.15199/48.2021.09.06](https://doi.org/10.15199/48.2021.09.06)

Надійшла до редакції 15.04.25 р.

ЖЕМЧУЖКІНА Тетяна Володимирівна – к.т.н., доцент, доцент кафедри біомедичної інженерії Харківського національного університету радіоелектроніки, Харків, Україна,
email: tatyana.zhemchuzhkina@nure.ua

TATYANA ZHEMCHUZHINA

**COMPARATIVE ANALYSIS OF THE ACCURACY OF CLASSIFICATION OF
ELECTROMYOGRAPHIC SIGNALS BY SECOND-ORDER DIFFERENCE GRAPHS FOR
DIFFERENTIATING TYPES OF PAIN IN THE LOWER BACK**

Kharkiv National University of Radio Electronics Kharkiv, Ukraine,

УДК: 004.932.2

А.Ю. МАРЧУК

АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ РОЗПІЗНАВАННЯ ПАТОЛОГІЙ ВУХА НА ОТОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕННЯХ

*Вінницький національний технічний університет,
21021, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна
E-mail: andriu4934@gmail.com*

Анотація. Проведено аналіз методів та засобів аналізу, класифікації патологій вуха, визначено особливості їх застосування, переваги та недоліки. Як результат проведеної роботи визначено шляхи удосконалення систем розпізнавання патологій вуха. Для цього дослідження використовувався пакет безкоштовного програмного забезпечення Image Composite Editor (ICE) 2.0 (Microsoft) для генерації безшовних складених зображень. Комбінація різних методів та алгоритмів обробки та класифікації зображень суттєво збільшує достовірність отриманих результатів. Подальші дослідження з метою покращення точності діагностики захворювань можуть бути спрямовані на поєднання різних алгоритмів обробки зображення та алгоритмів машинного навчання.

Ключові слова: розпізнавання зображень, глибоке навчання, локалізація об'єктів, виділення ознак, обмежувальні рамки, отоскоп, виявлення в реальному часі, алгоритм, фільтрація, захворювання, вухо, YOLO, OCTO, доповнена реальність.

Abstract. An analysis of methods and tools for the analysis and classification of ear pathologies was conducted, identifying their application features, advantages, and disadvantages. As a result of this work, ways to improve ear pathology recognition systems were determined. For this study, the free software package Image Composite Editor (ICE) 2.0 (Microsoft) was used to generate seamless composite images. The combination of different methods and algorithms for image processing and classification significantly increases the reliability of the results obtained. Further studies to improve the accuracy of disease diagnosis can be aimed at combining different image processing algorithms and machine learning algorithms.

Key words: image recognition, deep learning, object localization, feature extraction, bounding boxes, otoscope, real-time detection, algorithm, filtering, disease, ear, YOLO, OCTO, augmented reality..

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-227-234

ВСТУП

Останнім часом спостерігається все більш інтенсивна інтеграція комп'ютерних технологій, зокрема технологій комп'ютерного зору, у процес діагностики різноманітних захворювань. Так, локалізація та оцінювання об'єктів на цифрових зображеннях анатомічних структур відіграє вирішальну роль у медичній діагностиці. Зокрема, при виявленні патологій зовнішнього та середнього вуха в отоларингології важливу роль відіграє візуалізація зовнішнього слухового ходу і барабанної перетинки у вигляді отоскопічного зображення.

Найкращим діагностичним засобом є портативний отоскоп з відеоендоскопом порівняно з іншими інструментами для визначення зовнішнього слухового проходу, барабанної перетинки, нормальних чи незвичайних конструкцій у цих місцях. Проте після отримання отоскопічних зображень аналіз виявлених патологій вуха можна автоматизувати за допомогою технологій штучного інтелекту. Це може зменшити потребу в лікарях отоларингологів в районах, де їх кількість є критичною, призначивши медсестру для проведення першої оцінки осіб із скаргами на слух, які використовують автоматизовані діагностичні моделі.

Для вирішення завдань виявлення об'єктів на зображеннях анатомічних структур популярності набувають штучні нейронні мережі. Однак виникає низка труднощів у ході реалізації даної концепції. Постає необхідність знайти відповідний метод розпізнавання об'єктів на зображенні, а також відповідну мережеву архітектуру та прийнятні гіперпараметри задля інтеграції технології виявлення об'єктів у архітектуру нейронної мережі. Крім того, навчання відповідної мережі вимагає ручного створення та анутовання колекції зображень, оскільки немає бази даних цільових зображень або відео. Також необхідно враховувати, що через зазвичай великий обсяг, необхідний для нейронних мереж, потрібні зусилля, щоб мінімізувати розмір цієї колекції. Серед сучасних підходів згорткові нейронні мережі (CNN) є оптимальним рішенням, оскільки вони використовують згорткові шари, які автоматично виявляють локальні ознаки такі як: межі, текстуру чи аномальні плями, мають меншу кількість параметрів що спрощує роботу та процес навчання, не потребують спеціалізованого апаратного забезпечення та більш пристосовані до задач комп'ютерного зору ніж спайкові нейронні мережі (SNN).

Метою даної роботи є аналіз відомих методів та систем класифікації та обробки отоскопічних зображень, а також аналіз їх параметрів таких як чутливість, специфічність та точність, для визначення шляхів покращення точності при діагностиці захворювань вуха.

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ЦИФРОВОЇ ОТОСКОПІЇ

Отоскопія є основною діагностичною процедурою, яка використовується для огляду слухового проходу та барабанної перетинки (барабанної перетинки). Традиційні отоскопи являють собою портативні пристрої, що складаються зі збільшувальної лінзи, дзеркала, яке вставляється в слуховий прохід, і внутрішнього джерела світла. Ці пристрої дозволяють лікарям безпосередньо візуалізувати слуховий прохід і барабанну перетинку.

Поява цифрової отоскопії (ЦО) значно покращило діагностичний процес. Цифрові отоскопи оснащені камерами високої роздільної здатності, які фіксують зображення або відео слухового проходу та барабанної перетинки в реальному часі, які можуть відображатися на екрані для перегляду як лікарем, так і пацієнтом. Ці пристрої часто включають функції для запису та зберігання зображень, полегшення моніторингу здоров'я вуха пацієнта з часом, порівняння з минулими станами або обміну з фахівцями для консультації. На рисунку 1 показана стандартна процедура отоскопічного обстеження.

Барабанна перетинка
при перегляді через отоскоп



Рисунок 1 – Стандартна процедура цифрової отоскопії [1]

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

Цифрові отоскопи оснащені камерами високої роздільної здатності, які фіксують зображення або відео слухового проходу та барабанної перетинки в реальному часі, які можна відображати на екрані для перегляду як лікарем, так і пацієнтом. Залежно від обладнання, клінічної мети та потреб користувача існує кілька методів, у яких може бути застосована цифрова отоскопія:

- пряма візуалізація за допомогою цифрових отоскопів являє собою найпоширеніший метод. Пристрій оснащений камерою, джерелом світла та дисплеєм. Він забезпечує кращий огляд порівняно з традиційними отоскопами, дозволяючи клініцистам візуалізувати такі деталі, як інфекції, закупорки та перфорації барабанної перетинки;
- телемедицина та дистанційна діагностика – підключення цифрових отоскопів до телемедицинських платформ, що дозволяє проводити дистанційне обстеження. Цифрові дані передаються через Інтернет, що дозволяє медичним працівникам дистанційно переглядати та діагностувати захворювання вуха. Цей метод особливо корисний у місцях з обмеженим доступом до спеціалістів;
- 3D-цифрова отоскопія. Удосконалена цифрова отоскопія може включати тривимірне зображення, яке забезпечує більш повний огляд слухового проходу та барабанної перетинки. Цей метод використовує кілька зображень, зроблених під різними кутами, для створення 3D-моделі, що допомагає в детальній діагностиці та плануванні хірургічного втручання;
- отоскопія на основі смартфона: з появою мобільних технологій охорони здоров'я цифрові отоскопи на основі смартфонів стають популярними. Ці пристрої підключаються до смартфонів через спеціалізовані адаптери або програми, що дозволяє користувачам знімати та ділитися зображеннями вух. Цей метод є економічно ефективним і доступним, часто використовується для первинних скринінгів або самообстеження пацієнтів.

В таблиці 1 наведено порівняльну характеристику сучасних методів цифрової отоскопії. Оцінка кожного методу зосереджена на таких показниках, як точність, чутливість, специфічність [2], надаючи повний огляд можливостей класифікації моделі.

Цифрова отоскопія (DOV) поєднує класичний отоскоп із сучасною камерою, що дозволяє отримувати деталізовані зображення або навіть відеозаписи структур вуха. Це значно підвищує точність діагностики порівняно зі звичайним отоскопом, дає можливість зберігати дані для подальшого аналізу та використовувати їх у телемедицині. Однак висока вартість обладнання та залежність від якості камери можуть обмежувати його застосування, особливо в умовах обмежених ресурсів. Отоскопія на базі оптично когерентної томографії (ОСТО) – це інноваційний метод, який дозволяє отримувати тривимірні зображення середнього вуха з високою роздільною здатністю. Він особливо ефективний для виявлення мікроскопічних патологій, таких як отосклероз або тонкі перфорації барабанної перетинки. Однак ОСТО залишається дорогим і складним у використанні інструментом, доступним переважно у великих медичних центрах або науково-дослідних установах. Отоскопія з доповненою реальністю (AR) – це перспективний напрямок, який поєднує звичайну отоскопію з комп'ютерною візуалізацією. AR-отоскопи можуть автоматично виділяти патологічні ділянки, що значно полегшує діагностику та навчання лікарів. Проте ця технологія поки що потребує доопрацювання алгоритмів обробки зображень, оскільки ризик помилок при автоматичній сегментації залишається значним. Крім того, AR-отоскопи часто вимагають спеціальних гарнітур або програмного забезпечення, що ускладнює їх масове впровадження. Отоскопія з використанням смартфонів – один із найдоступніших варіантів, оскільки дозволяє проводити діагностику за допомогою спеціальних насадок на звичайний телефон. Це ідеальний варіант для віддалених регіонів або швидкого скринінгу, оскільки не вимагає дорогого обладнання та дозволяє легко передавати зображення лікарям. Однак якість знімання сильно залежить від камери смартфона, а неправильне освітлення або фокусування може призвести до помилкових результатів.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів цифрової отоскопії

Метод	Чутливість	Специфічність	Абсолютна точність
DOV	70–85%	75–90%	75–85%
ОСТО	85–95%	90–98%	85–93%
AR - отоскопія	85–95%	90–98%	90–95%
Отоскопія з використанням смартфонів	70–90%	80–85%	75–80%

АНАЛІЗ СУЧАСНИХ СИСТЕМ ОБРОБКИ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ ОТОСКОПІЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Обробка зображень є ключовим елементом у підготовці результатів отоскопічної діагностики, оскільки вона спрямована на підвищення якості захоплених зображень для кращої візуалізації та аналізу. Однією з поширених проблем у отоскопічних відео є розмитість під час руху, спричинена рухом отоскопа під час огляду. Тому основний напрямок запропонованих методів обробки є зменшення цього розмиття, згладжування зображення та виділення важливих особливостей, таких як запалення, накопичення рідини або перфорації в барабанній перетинці. Необхідно отримати якомога більше відповідної інформації із зображення, переконавшись, що воно є достатньо чітким для діагностичних цілей.

Після покращення якості зображення наступним кроком є визначення значущих областей для аналізу. Це передбачає визначення найчіткіших, найбільш актуальних ділянок зображення, які часто є частинами барабанної перетинки або слухового проходу, де можуть бути аномалії. Тобто важливо виключити нерелевантні ділянки із зображення, такі як відблиски або відбиття від світла отоскопа.

У контексті класифікації оброблені отоскопічні зображення аналізуються для подальшого віднесення їх до таких діагностичних груп, такі як нормальні, інфіковані або перфоровані барабанні перетинки. Машинне навчання відіграє тут вирішальну роль, оскільки воно автоматизує процес класифікації шляхом навчання алгоритмів на великих наборах даних мічених отоскопічних зображень. Для цього зазвичай використовуються глибокі згорткові нейронні мережі (DCNN) [3], оскільки вони особливо ефективні у розпізнаванні шаблонів і особливостей медичних зображень. За допомогою таких методів, як навчання з перенесенням, коли попередньо навчена модель адаптується для конкретних завдань, ці мережі можуть класифікувати захворювання вуха з високою точністю, навіть якщо набір даних є обмеженим.

Виявлення об'єктів відрізняється від класифікації зображень тим, що воно також передбачає аналіз положення об'єкта на зображенні. Це зазвичай представлено через обмежувальні рамки. Крім того, виявлення об'єктів має ідентифікувати декілька об'єктів на одному зображенні. Класифікація отоскопічних зображень створює певні проблеми через різну якість зображення, тонкі візуальні відмінності в стані вуха, обмежені навчальні дані, дисбаланс класів і необхідність адаптації домену. Анатомічні варіації, міжкласова мінливість і відсутність анотацій ще більше ускладнюють точну класифікацію. Такі фактори, як етнічна приналежність, вік і розвиток медичних знань, вимагають адаптивних моделей.

Алгоритм You Only Look Once (YOLO) є перспективною архітектурою нейронної мережі для виявлення об'єктів на отоскопічних зображеннях, що веде до їх подальшої класифікації [4]. При використанні алгоритму YOLO нейронна мережа прогнозує об'єкти у вхідному зображенні. Щоб зрозуміти цей алгоритм, важливо зрозуміти структуру міток основних істин (GroundTrough) та прогнозів, які формують вихід нейронної мережі. Вхідне зображення поділяється на сітку $S \times S$ комірок. Комірка, що містить центр об'єкта, відповідає за його виявлення, в ідеалі призначаючи кожен об'єкт одній комірці. У кожній із цих комірок виділяється B обмежувальних рамок. Вибір кількості комірок і обмежувальних рамок є довільним у дизайні моделі виявлення об'єктів YOLO.[5] Обмежувальна рамка характеризується координатами (x, y, w, h) і оцінкою достовірності. Координати (x, y) представляють центр обмежувальної рамки як відносний зсув від відповідної комірки. Значення w і h вказують на висоту та ширину обмежувальної рамки відносно всього зображення. Обмежувальні рамки служать для визначення положення та розміру об'єктів на зображеннях. Оцінка достовірності (confidence), кінцеве значення, що інкапсулює обмежувальну рамку, визначає, чи містить вона об'єкт і наскільки добре вона відповідає цьому об'єкту.

Формально оцінка достовірності обмежувальної рамки визначається як:

$$Confidence = P(Object) \times IoU_{truth}^{pred} \quad (1)$$

де $P(Object)$ – показник об'єктності, що визначає ймовірність присутності об'єкта в обмежувальній рамці, а IoU_{truth}^{pred} визначає, наскільки є точними розмір і положення прогнозованої рамки порівняно з фактичним об'єктом.

Щоб навчити модель виявляти об'єкти за допомогою алгоритму YOLO, необхідно встановити основну істину для кожного зображення в наборах даних навчання та оцінки. Ця основна істина охоплює відповідні визначення обмежувальної рамки для об'єктів у кожній відповідній комірці сітки. Отже, базова правда анується координатами об'єкта та оптимальними оцінками достовірності для обмежувальних рамок[6]:

- відсутність об'єктів у комірці: оцінка достовірності дорівнює 0, тому що $P(\text{Object})=0$;
- присутній об'єкт: $P(\text{Object})=1$, отже $\text{Confidence} = 1 \times \text{IoU}_{\text{truth}}^{\text{pred}} = \text{IoU}_{\text{truth}}^{\text{pred}}$;
- об'єкт точно існує в координатах (x, y, w, h) обмежувальної рамки $P(\text{Object}) = 1, \text{IoU}_{\text{truth}}^{\text{pred}} = 1$, в результаті $\text{Confidence} = 1 \times 1 = 1$.

Інший метод, OCASD (Object Counting and Anomaly Detection) був розроблений у відповідь на дефіцит загальнодоступних наборів даних для класифікації отоскопічних зображень [7]. Після перегляду випадків у дослідженні пов'язаному із дво-етапною обробкою отоскопічних зображень барабанної перетинки[8] стало очевидним, що в категоріях «Закупорка серуменом», «Хронічний середній отит», «Мірінгосклероз» і «Нормальний стан вуха» були відфільтровані зайві випадки, і було вибрано 100 зображень на категорію, щоб забезпечити збереження найбільш інформативних. Подібним чином, надлишкові або менш інформативні зображення також були відфільтровані для категорії «Гострий середній отит», а додаткові зображення були отримані з Інтернету, щоб компенсувати відсутність різноманітності в цій категорії. Після перевірки OCASD містив 500 зображень у 5 різних категоріях (таблиця 2).

Таблиця 2

Остаточні екземпляри набору даних OCASD

Категорії	Початкові екземпляри	Екземпляри після фільтрації	Екземплярів включено
Закупорка серуменом	220	134	100
Хронічний середній отит	220	174	100
Мірінгосклероз	220	141	100
Нормальний стан вуха	220	166	100
Гострий середній отит	83	74	69
	147	42	31

Для класифікації використана двоетапна архітектура, зображена на рисунку 2 [9]. Спочатку кожне опорне зображення поєднувалося з двома іншими зображеннями: одне з тієї ж категорії (позитив) і одне з іншої категорії (негатив). Ця установка полегшила застосування триплетних втрат разом із втратами крос-ентропії для класифікації. Кожне зображення було змінено до 226×226 і оброблено через мережу ResNeXt-18 для вилучення векторних характеристик [10]. Після завершення класифікації опорне зображення проходить кілька етапів попередньої обробки перед тим, як воно передаватиметься у налаштовану модель CLIP [11-22]. Вбудовані зображення з CLIP поєднуються з вбудованими текстами, отриманими з попередньо визначеної підказки. Поєднання вбудованих зображень і тексту має вирішальне значення для створення точних підсумків, які відображають діагностичний сенс зображення [12, 23-26].



Рисунок 2 – Архітектура системи, призначеної для класифікації отоскопічних зображень [9]

БІОМЕДИЧНІ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ ТА ПРИЛАДИ

В останньому методі [13], оглянутому в даній роботі, була створена база даних відео цифрових отоскопів високої роздільної здатності з відповідними діагностичними мітками. Зібрані відео з отоскопа були позбавлені будь-якої ідентифікаційної захищеної інформації про здоров'я, що гарантувало, що відео неможна було пов'язати з будь-яким конкретним пацієнтом [14]. Збір даних проводився за допомогою відеоотоскопа високої чіткості (HD) (JEDMEDHorus+ HDVideoOtoscope, St. Louis, MO), який є портативним цифровим отоскопом з РК-видошукачем для перегляду відео в реальному часі. Цей пристрій дозволяв відображати на екрані та миттєво переглядати послідовності зображень. Після кожного обстеження відеозаписи надійно зберігалися на сервері [15]. Набір даних охоплює майже всі основні діагностичні категорії барабанної перетинки, такі як нормальний стан, гострий середній отит, випіт, перфорація барабанної перетинки, мірингіт, тимпаносклероз, втягнута барабанна перетинка, холестеатома та барабанні перетинки з вентиляційними трубками. Через відсутність достатньої кількості зразків у деяких категоріях, таких як АОМ, лише чотири категорії були обрані для якісних експериментів: випіт, перфорація барабанної перетинки, тимпаносклероз і нормальний стан БП [16]. У таблиці 3 детально описано технічні характеристики набору відео даних отоскопа.

Таблиця 3

Технічні характеристики набору відеоданих отоскопа.

Діагностичні категорії	Число відоезаписів	Число кадрів
Випіт	114	43417
Нормальний стан	169	35505
Перфорація	56	19732
Тимпаносклероз	55	13063
Загалом	394	111717

Для цього дослідження використовувався пакет безкоштовного програмного забезпечення Image Composite Editor (ICE) 2.0 (Microsoft) для генерації безшовних складених зображень [17]. Перед зшиванням не релевантні кадри були відфільтровані за допомогою фільтрації Гаусата α -форм для покращення якості композитів [18]. Трансферне навчання (TransferLearning – TL) було використано для підвищення ефективності навчання глибоких згорткових нейронних мереж (DCNN) шляхом використання знань із попередньо навченої моделі на ImageNet. Архітектура ResNet-101, яка була попередньо навчена на ImageNet, була налаштована для класифікації відео отоскопа з використанням відео отоскопії як цільового набору даних. Для збільшення розміру набору даних і покращення узагальнення моделі було застосовано методи збільшення даних, такі як обертання, масштабування, перевертання та трансляція. Використання кількох складених зображень призвело до кращої продуктивності класифікації порівняно з окремими складеними зображеннями та ключовими кадрами. В даному дослідженні вдалось досягти результатів чутливості в 74.7%, специфічності – 91.7% та абсолютної точності в 73.7%. Порівняльна характеристика розглянутих систем та методів продемонстрована в таблиці 4.

Таблиця 4

Порівняльна характеристика методів обробки та класифікації отоскопічних зображень

Метод	Чутливість	Специфічність	Абсолютна точність
YOLO	78-86%	>92%	~80%
OCASD	80-85%	90-97%	78-84%
ResNet-101 + TL	74.7%	91.7%	73.7%

ВИСНОВОК

Аналіз сучасних методів та систем обробки отоскопічних зображень демонструє їх перспективність в сучасній діагностиці захворювань вуха таких як отит, перфорації барабанної перетинки, закупорка сіркою. Комбінація різних методів та алгоритмів обробки та класифікації зображень суттєво збільшує достовірність отриманих результатів. Подальші дослідження з метою покращення точності діагностики захворювань можуть бути спрямовані на поєднання різних алгоритмів обробки зображення та алгоритмів машинного навчання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Bassiouni, M., D. G. Ahmed, S. I. Zabaneh, S. Dommerich, H. Olze, P. Arens, and K. Stölzel. Endoscopic ear examination improves self-reported confidence in ear examination skills among undergraduate medical students compared with handheld otoscopy. *GMS J. Med. Educ.* 39(1):doc 3, 2022.
2. Sicora, M. V. Gluboki neyronny mereshi v kompyuternomy zori. Lviv : Vydavnistvo Lvivskoi politehniku, 2021. 356 s. ISBN 978-966-941-234-5.
3. Zheng T., Sha J., Deng Q., Geng S., Xiao S., Yang W., Byrne C., Targher G., Li Y., Wang X., Wu D., Zheng M. Object detection: A novel AI technology for the diagnosis of hepatocyte ballooning. *Liver international : official journal of the International Association for the Study of the Liver*. 2023. №44. DOI:10.1111/liv.15799.
4. Huang R., Lin R., Dong A., Wang Z. Few-Shot Object Detection Based on Adaptive Attention Mechanism and Large-Margin Softmax. *AATCC J Res*, 2022. DOI:10.1177/24723444221136626.
5. Hussain R., Lalande A., Marroquin R., Girum K.B., Guigou C., Bozorg Grayeli A. Real-Time Augmented Reality for Ear Surgery. 21st International Conference, Granada, Spain, September 16-20, 2018, Proceedings, Part IV. DOI:10.1007/978-3-030-00937-3_38.
6. Khan E., Khan A. Sumotosima: A Framework and Dataset for Classifying and Summarizing Otoscopic Images. *arXiv:2408.06755*. 2024.
7. Li Z., Dong M., Wen S., Hu X., Zhou P., Zeng Z. CLU-CNNs: Object detection for medical images. *Neurocomputing*, 2019, 350 p. DOI:10.1016/j.neucom.2019.04.028.
8. Lim L.A., Keleş H.Y. Learning Multi-Scale Features for Foreground Segmentation. *Pattern Anal Appl.* 2019. № 23.PP. 1369–1380. DOI:10.1007/s10044-019-00845-9.
9. Lin Z., Wang Y., Tang Z. Training-Free Open-Ended Object Detection and Segmentation via Attention as Prompts, 2024. DOI:10.48550/arXiv.2410.05963.
10. Ma S., Xu Y. FPDIoU Loss: A Loss Function for Efficient Bounding Box Regression of Rotated Object Detection, 2024. DOI:10.48550/arXiv.2405.09942.
11. Marroquin R., Lalande A., Hussain R., Guigou C., Grayeli A.B. Augmented reality of the middle ear combining otoendoscopy and temporal bone computed tomography. 2018.
12. Megawati M., Alwani N., Fitrianto A., Erfiani, Nugraha A. Agglomerative Nesting Cluster Analyst in Mapping District/City Health Facilities in West Java Province. *Jurnal Matematika Statistika dan Komputasi*, 2024. № 20.PP. 484-496. DOI:10.20956/j.v20i3.32043.
13. Moberly A.C., Zhang M., Yu L., Gurcan M., Senaras C., Teknos T.N., Elmaraghy C.A., Taj-Schaal N., Essig G.F. Digital otoscopy versus microscopy: How correct and confident are ear experts in their diagnoses? 2018. № 24(7). 453-459PP. DOI:10.1177/1357633X17708531.
14. Mohammed K.K., Hassanien A.E., Afify H.M. Classification of Ear Imagery Database Using Bayesian Optimization Based on CNN-LSTM Architecture. *J Digit Imaging*. 2022. № 35.PP. 947–961. DOI:10.1007/s10278-022-00617-8.
15. Moshtaghi O., Sahyouni R., Haidar Y.M., Huang M., Moshtaghi A., Ghavami Y., et al. Smartphone-Enabled Otoscopy in Neurotology/Otology. 2017. № 156. 554-558.
16. Polk M.L., Lailach S., Kemper M., Bendas A., Zahnert T., Neudert M. Lernkurve der HNO-Spiegeluntersuchung: Zielgerichtete Lehrveranstaltungsplanung zu einer psychomotorischen Fertigkeit.
17. Raghu M., Zhang C., Kleinberg J., Bengio S. Transfusion: Understanding Transfer Learning for Medical Imaging. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2019. PP. 3347–3357.
18. Raina V., Molchanova N., Graziani M., Malinin A., Müller H., Bach Cuadra M., Gales M.J.F. Tackling Bias in the Dice Similarity Coefficient: Introducing nDSC for White Matter Lesion Segmentation, 2023. DOI:10.48550/arXiv.2302.05432.
19. Wójcik W., Pavlov S., Kalimoldayev M. *Information Technology in Medical Diagnostics II*. London: (2019). Taylor & Francis Group, CRC Press, Balkema book. – 336 Pages.
20. Highly linear Microelectronic Sensors Signal Converters Based on Push-Pull Amplifier Circuits / edited by Waldemar Wojcik and Sergii Pavlov, Monograph, (2022) NR 181, Lublin, Comitet Inzynierii Srodowiska PAN, 283 Pages. ISBN 978-83-63714-80-2
21. Pavlov Sergii, Avrunin Oleg, Hrushko Oleksandr, and etc. (2021). System of three-dimensional human face images formation for plastic and reconstructive medicine // Teaching and subjects on bio-medical engineering Approaches and experiences from the BIOART-project Peter Arras and David Luengo (Eds.),

- Corresponding authors, Peter Arras and David Luengo. Printed by Acco cv, Leuven (Belgium). - 22 P. ISBN: 978-94-641-4245-7.
22. Pavlov S.V., Avrunin O.G., etc. (2019). Intellectual technologies in medical diagnosis, treatment and rehabilitation: monograph / [S. In edited by S. Pavlov, O. Avrunin. - Vinnytsia: PP "TD "Edelweiss and K", 260 p. ISBN 978-617-7237-59-3.
 23. Romanyuk, O., Zavalniuk, Y., Pavlov, S., etc. (2023). New surface reflectance model with the combination of two cubic functions usage, Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Srodowiska, , 13(3), pp. 101–10
 24. Kukharchuk, Vasyl V., Sergii V. Pavlov, Volodymyr S. Holodiuk, Valery E. Kryvonosov, Krzysztof Skorupski, Assel Mussabekova, and Gaini Karnakova. (2022). "Information Conversion in Measuring Channels with Optoelectronic Sensors" Sensors 22, no. 1: 271. <https://doi.org/10.3390/s22010271>.
 25. Vasyl V. Kukharchuk, Sergii V. Pavlov, Samoil Sh. Katsyv, and etc. (2021). Transient analysis in 1st order electrical circuits in violation of commutation laws”, Przegląd elektrotechniczny, ISSN 0033- 2097, R. 97 NR 9/2021, p. 26-29, doi:10.15199/48.2021.09.05.
 26. Pavlov S.V, Petruk V.G., Kolesnik P.F. (2007). Photoplethysmographic technologies of the cardiovascular control: monography, Vinnitsa: Universum-Vinnitsa, 254 p

Надійшла до редакції 02.04.25 р.

МАРЧУК АНДРІЙ ЮРІЙОВИЧ - аспірант кафедри біомедичної інженерії та оптико-електронних систем, Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе, 95, м. Вінниця, Україна,
e-mail: andriu4934@gmail.com

ANDRIY MARCHUK

ANALYSIS OF METHODS AND SYSTEMS FOR RECOGNITION OF EAR PATHOLOGIES ON OTOSCOPIC IMAGES

Vinnytsia National Technical University, Khmelnytske Shosse, 95, Vinnytsia, Ukraine,

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРІ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

УДК 621.382

О.В. ОСАДЧУК, Я.О. ОСАДЧУК, В.І. ПЕТРЕНКО, В.К. СКОЩУК, К.В. ШИКУН

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСА НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ

Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, м. Вінниця, Україна, e-mail:osadchuk.av69@gmail.com

Анотація. У роботі проведено експериментальне дослідження нового схематехнічного рішення генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності транзисторної структури між колекторами першого та другого біполярних транзисторів, а третя це струм, який протікає через індуктивність коливального контуру. Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Були проведені експериментальні дослідження від низьких частот до мікрохвильових частот для визначення оптимальних робочих частот для різних задач використання розробленого пристрою. Отримано ВАХ, діаграму Сміта параметру S_{11} , імпеданс S_{11} , активну та реактивну складові повного опору, еквівалентну ємність та індуктивність, SWR генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц. А також отримано експериментальні осцилограми розробленого генератора хаосу. У порівнянні з аналогами запропонований та досліджений генератор детермінованого хаосу має покращену навантажувальну здатність і вищу швидкодію має малий час встановлення стаціонарних коливань.

Ключові слова: генератор детермінованого хаосу, автогенератор, детермінований хаос, транзисторна структура, від'ємний диференціальний опір.

Abstract. The work presents an experimental study of a new circuit solution for a deterministic chaos generator based on a bipolar transistor structure with negative differential resistance. This chaos generator system has three dynamic variables: the voltage on the equivalent capacitance of the transistor structure between the collectors of the first and second bipolar transistors, and the third is the current flowing through the inductance of the oscillatory circuit. The dynamic processes of deterministic chaos are determined by the reactive properties of the transistor structure with negative differential resistance. Experimental studies were conducted from low frequencies to microwave frequencies to determine the optimal operating frequencies for various tasks of using the developed device. The I-V characteristic, the Smith chart of the S_{11} parameter, the S_{11} impedance, the active and reactive components of the impedance, the equivalent capacitance and inductance, and the SWR of the chaos generator based on two bipolar transistors in the frequency range from 15 kHz to 1 GHz were obtained. And also experimental oscillograms of the developed chaos generator were obtained. In comparison with analogues, the proposed and investigated deterministic chaos generator has improved loading capacity and higher speed, has a short time of establishment of stationary oscillations.

Keywords: deterministic chaos generator, auto-oscillator, deterministic chaos, transistor structure, negative differential resistance.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-235-246

ВСТУП

Інтернет речей (IoT) – це постійно зростаюча кількість різноманітних пристроїв з доступом до Інтернету для засобів зв'язку, збору даних, передачі даних та моніторингу інформаційно-вимірювальних, комп'ютерних систем загального та спеціального призначення.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Пристрої, інтегровані з IoT, не завжди є носимі пристрої та мобільні телефони, але також включають транспортні засоби, системи моніторингу фізичних величин, системи безпеки, військової техніки, пристрої моніторингу тварин і сільськогосподарських систем [1–3]. Ці пристрої постійно розвиваються, з вимогами щодо зниження енергоспоживання, зменшення форм-факторів, покращення безпеки та збільшення пропускну здатності, з унікальними вимогами залежно від застосування пристрою [1, 2].

Однією з головних проблем для пристроїв Інтернету речей є високопродуктивна безпека, яка потенційно може бути використана для таких застосувань, як шифрування зображень та відео, зберігаючи при цьому низький профіль енергоспоживання. Задоволення цієї потреби є нетривіальним, оскільки необхідно шукати компроміси між управлінням живленням та безпекою. Часто, під час підвищення безпеки системи виникає вроджена потреба у більшій потужності. Це складне рішення для інженерів пристроїв Інтернету речей, і часто воно залежить від конкретного застосування. Задоволення цих потреб у конфіденційності пов'язане з кількома перешкодами.

Для цього можна використовувати потокові шифри на основі хаосу, які є дуже захищеними від криптографічних атак, оскільки хаотичні сигнали є внутрішньо захищеними та мають високу нелінійність [3]. Безпека поточкового шифру значною мірою залежить від генератора псевдовипадкових чисел (ГВПЧ), який діє як основний компонент системи.

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

В останні роки спостерігається розвиток різноманітних криптосистем, що використовують хаотичні системи та карти, зокрема для генерації псевдовипадкових чисел та шифрування. Деякі з них мають проблеми з безпекою або низькою обчислювальною продуктивністю [4–6]. Більше того, деякі з цих криптосистем не дуже добре підходять для використання на інтелектуальних пристроях з обмеженими ресурсами, такими як низький обсяг пам'яті, обмежені обчислювальні можливості та проблеми енергоефективності [7, 8]. Пристрої, що використовуються в Інтернеті речей, мають низьке енергоспоживання та обмежені ресурси, тому для цих пристроїв апаратна реалізація криптосистем є більш доцільною, ніж програмна.

Хаотичні системи характеризуються чутливістю до початкових умов, широким спектром та шумоподібними формами хвиль. Однак хаотичні системи є детермінованими, що означає, що динаміка системи не є випадковою, як шум, і тому може бути контрольовано використана. Хаотичні системи базуються на нелінійності та можуть мати різні фізичні реалізації. Осцилятори хаосу – це малопотужні аналогові схеми, які демонструють хаотичну поведінку та спеціально розроблені для роботи як джерело хаотичних сигналів. Першими широко вивченими осциляторами хаосу були осцилятор хаосу Чуа [7], осцилятор хаосу Колпіттса [8], осцилятор хаосу Вільнюса [9], RC-осцилятор хаосу [10] та мемристорний осцилятор хаосу [11]. Протягом багатьох років деякі автори внесли модифікації до оригінальних схем [12–15], а також були запропоновані інші схеми [16–18]. Хаотичні осцилятори складаються з індукторів, конденсаторів, резисторів, діодів, транзисторів та операційних підсилювачів. Хаотичну поведінку також можна спостерігати в інших схемах за певних умов, таких як перетворювачі постійного струму, як показано в [19].

Щодо дискретних хаотичних джерел, найпоширенішим підходом є хаотичні відображення – дискретні нелінійні функції. Хаотичні відображення зазвичай використовуються для шифрування завдяки своїй прямій, дискретній природі [20, 21]. Іншим способом реалізації дискретного хаосу є отримання числових розв'язків нелінійних рівнянь схем. Хоча це новий підхід, він набув популярності в останні роки [22] завдяки кращому контролю над початковими умовами та зменшенню неточності аналогових компонентів. Дискретні хаотичні джерела також набули популярності завдяки можливості їх реалізації в програмованих користувачем вентильних матрицях (FPGA), як показано в [23].

Метою роботи є експериментальне дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в якому втрати енергії в коливальній системі компенсуються енергією диференційного від'ємного опору.

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Особливістю генерування сигналів детермінованого хаосу аналоговими пристроями є використання їхніх нелінійних статичних або динамічних характеристик. Простота схемотехнічних рішень транзисторних генераторів детермінованого хаосу є необхідною умовою для зменшення нестабільностей

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

в роботі телекомунікаційних та радіотехнічних приладів і систем загального та спеціального призначення.

На основі аналізу вибору оптимального варіанта схемного рішення транзисторного генератора детермінованого хаосу, доцільно використовувати частотний метод перетворення інформаційного сигналу, який дозволяє підвищити вихідну потужність генератора хаосу, а також розширити частотний діапазон генерованого хаотичного сигналу [24, 25]. Теоретичні та експериментальні дослідження показали, що в якості схем генераторів детермінованого хаосу доцільно використовувати схемні рішення генераторних схем на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором [26 – 29], які реалізують частотний принцип перетворення інформативного сигналу. Повний опір такої транзисторної структури, в залежності від виду його ВАХ, має ємнісний або індуктивний характер, а його величина залежить від напруги живлення та керування.

У роботі представлені експериментальні дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, електрична схема якого представлена на рис. 1. Нелінійна динаміка електричних коливань формується завдяки нелінійності другого порядку статичної ВАХ діода та нелінійного послідовного коливального кола, реактивними елементами якого є індуктивність котушки та еквівалентна ємність р-п переходу. Описуючи динамічні процеси у такому колі, потрібно врахувати, що еквівалентна ємність діода різна для додатного та від'ємного півперіодів синусоїдального коливання (відповідно дифузійна та бар'єрна ємності р-п переходу), а також те, що діод пропускає струм лише у прямому змищенні [14].

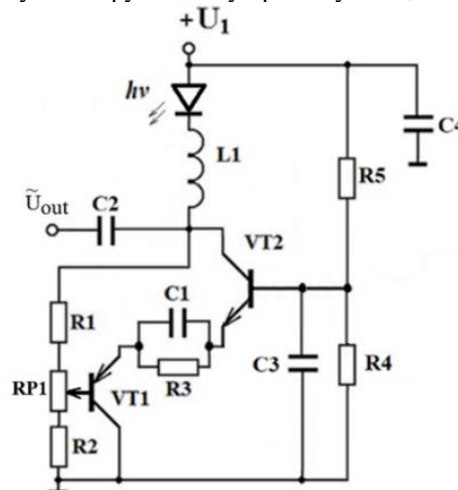


Рисунок 1 – Схема генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором

Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором.

Для опису динамічних процесів у схемі генератора детермінованого хаосу з інерційною нелінійністю на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним опором доцільно використати математичну модель [14], яку нормовано у часі

$$T = \omega_0 t \quad (1)$$

та нормованих змінних має вигляд

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = mx_1 + x_2 - x_1 x_3 - dG(x_1); \\ \dot{x}_2 = -x_1; \\ \dot{x}_3 = -gx_3 + gI(x_1)F(x_1), \end{cases} \quad (2)$$

де $G(x_1)$ – нормована функція апроксимації робочої вітки з сімейства ВАХ біполярної транзисторної структури; $F(x_1)$ – нормована функція апроксимації статичної ВАХ напівпровідникового діода; ω_0 – частота стаціонарних періодичних коливань генератора; $I(x_1)$ – функція, яка описує умову пропускання струму крізь діод у прямому напрямку; g – параметр автоколивальної системи, який пропорційний

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

відносному часу релаксації інерційного елемента ($g = 0,1...0,9$); m – параметр автоколивальної системи, який пропорційний різниці внесеної в коливальний контур та розсіяної енергії ($m=0,6...1,2$); d – малий параметр, який відповідає ступеню впливу нелінійності крутизни ВАХ транзисторної структури ($d = 0,1...0,2$) [14].

Для зміни динаміки хаотичних коливань, а також розширення фазового простору, додано послідовний ланцюг з резистора R4 та ємності C3, до індуктивної вітки базової схеми генератора на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором також додано коло з послідовно включених світловипромінюючим діодом. Для термостабілізації роботи генератора детермінованого хаосу введено ланцюг з паралельного включення ємності C1 та резистора R3. Генерована хаотична напруга знімається із колектора біполярного транзистора VT2. В даному випадку хаотична динаміка контролюється зміною напруги на базі біполярного транзистора підстроювальним резистором RP1. Під час підключення опору навантаження, необхідно враховувати внесений нею активний та реактивний опір до коливального контуру генератора хаосу на основі біполярної транзисторної структури.

Оскільки генератор детермінованого хаосу побудований на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором і може працювати в широкому діапазоні частот, були проведені експериментальні дослідження від низьких частот до мікрохвильових частот для визначення оптимальних робочих частот для різних задач використання розробленого пристрою. У діапазоні від 15 кГц до 0,75 ГГц, працюючи безпосередньо з FPGA отримуємо високу точність перетворення і синхронізації з паралельними потоками даних від кількох пристроїв приймання і передавання. Нижче наведені експериментальні дані за дослідженням генератора детермінованого хаосу. Розроблено експериментальний зразок генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів BFR92 і BFT93, що утворюють напівпровідникову структуру з від'ємним диференціальним опором. У середовищі Scilab 6.11 на основі експериментальних даних побудовано вольт-амперні характеристики транзисторної структури на основі біполярних транзисторів BFR92 та BFT93, які наведені на рис.2.

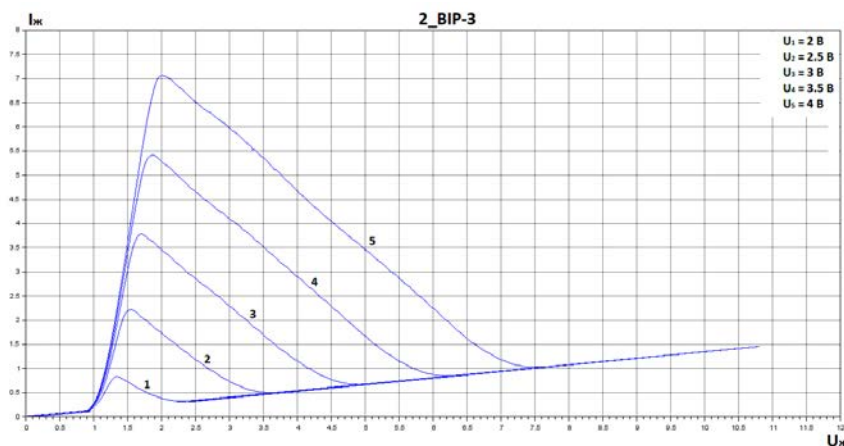


Рисунок 2 – Вольт-амперна характеристика транзисторної структури на основі біполярних транзисторів BFT93 і BFR92

Сім'яство вольт-амперних характеристик транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором отримано шляхом заміни дільника напруги R1, R2 додатковим джерелом керуючої напруги V2. Експериментальні дослідження проводили з керуючими напругами в діапазоні від 2,0 В до 4,0 В з кроком 0,5 В.

На рис. 3 показана діаграма Сміта параметру S11 досліджуваної структури в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц. На рис. 4 зображено імпеданс S11 досліджуваної структури. На рис. 5 показано зміну параметру S11 (активна та реактивна складова) в тому ж діапазоні частот, а на рис. 6 зміна активної а на рис.7 реактивної складових імпедансу генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

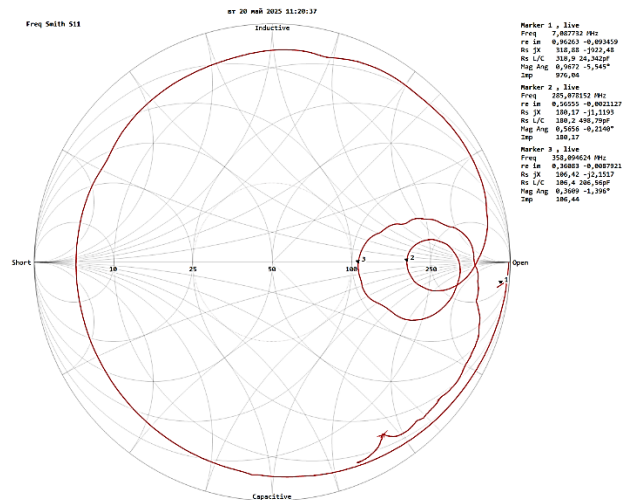


Рисунок 3 – Діаграма Сміта параметру S11 генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц

Як зазначалося вище, генератор хаосу на основі двох біполярних транзисторів для комп'ютерних та інформаційно-вимірювальних систем і мереж загального та спеціального призначення на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором і зміна імпедансу транзисторної структури робить внесок у налаштування частоти від зміни напруги керування. Тому дослідження імпедансу (як активної, так і реактивної складових імпедансу в широкому діапазоні частот) цієї структури є невід'ємною частиною розробки пристрою. Експериментальні дослідження параметрів S11 проводяться в активному режимі з живленням через модуль живлення RF+DC. Він складається з високочастотних котушок індуктивності та конденсаторів із над широкою смугою, майже ідеальною, та без резонансної точки. Високочастотна індуктивність ізолює потік інформації змінного струму, щоб запобігти витoku високочастотних сигналів у блок живлення.

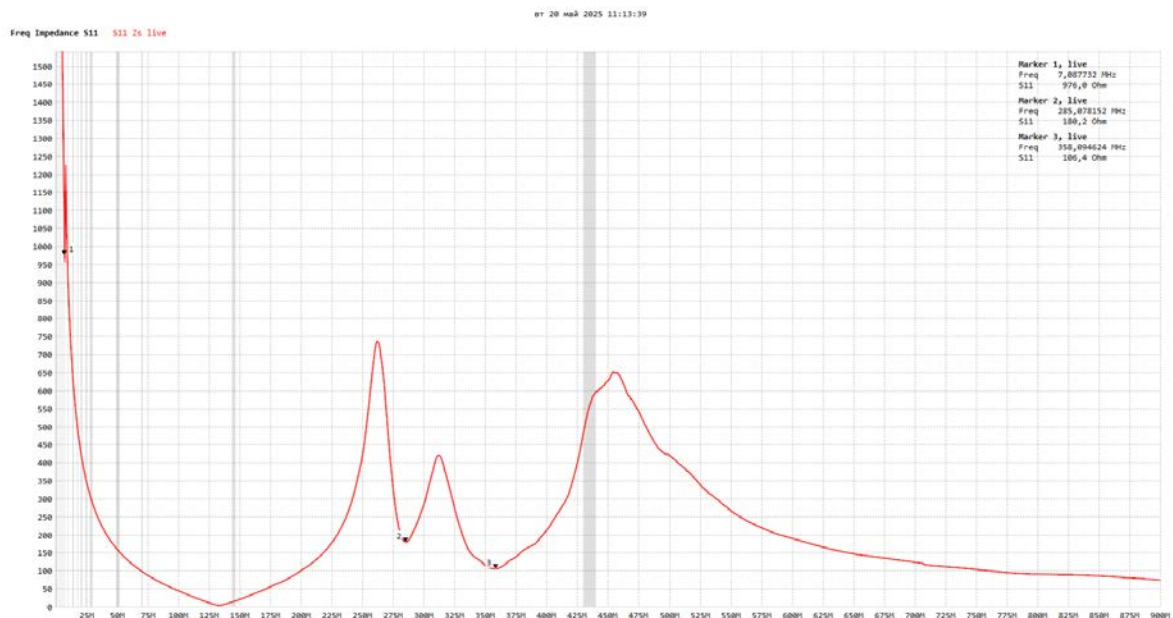


Рисунок 4 – Зміна імпедансу S11 генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРІ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

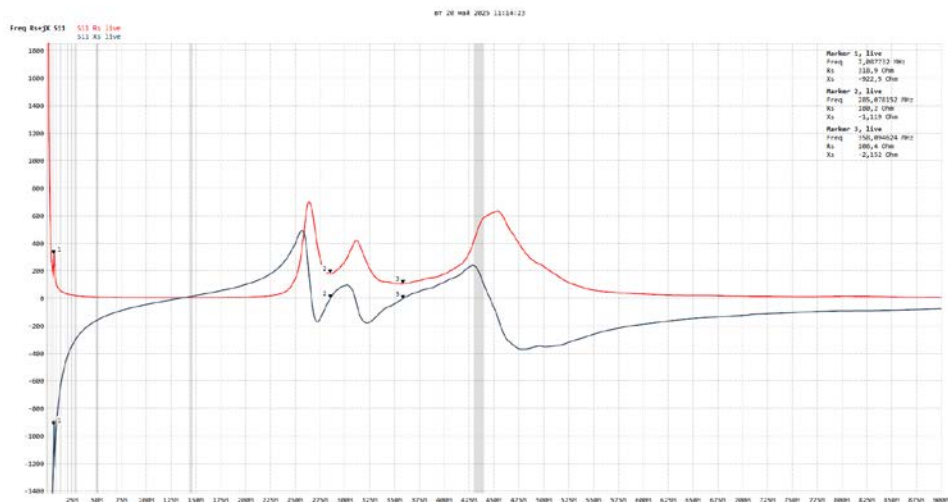


Рисунок 5 – Зміна параметру S11(активна та реактивна складова) генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторах в діапазоні частоти від 15 кГц до 1 ГГц

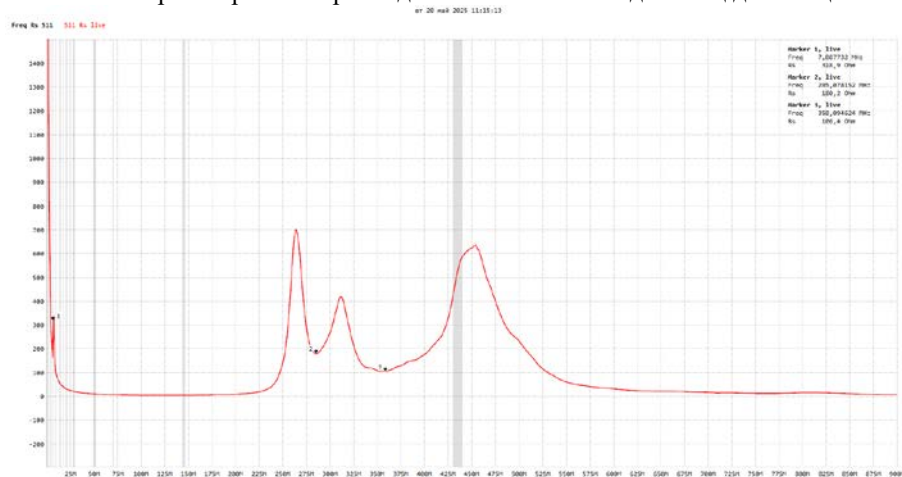


Рисунок 6 – Зміна активної складової імпедансу генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторах в діапазоні частоти від 15 кГц до 1 ГГц

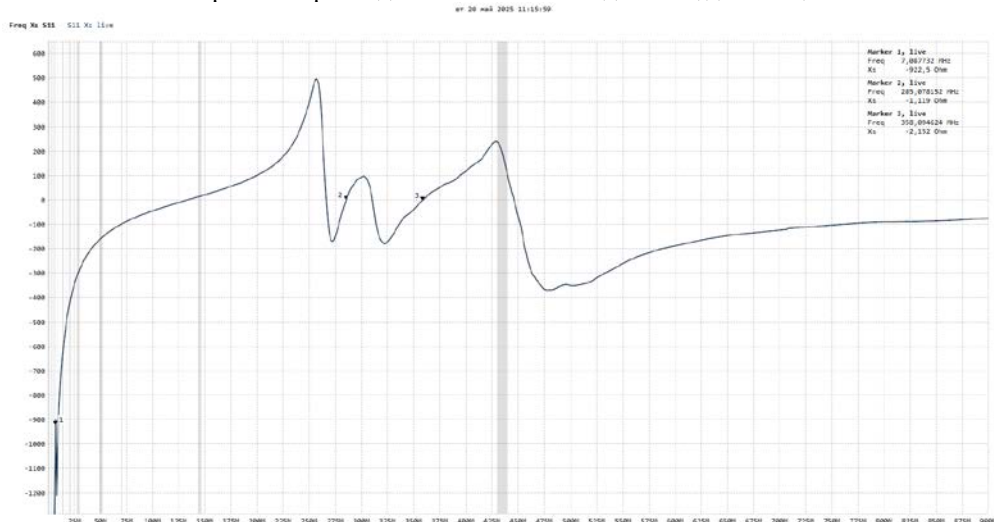


Рисунок 7 – Зміна реактивної складової імпедансу генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторах в діапазоні частоти від 15 кГц до 1 ГГц

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Експериментальні залежності прохідної ємності автоколивального приладу подано на рис.8, а на рис.9 подано індуктивність досліджуваної структури в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц.



Рисунок 8 – Зміна прохідної ємності генератора хаосу в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц



Рисунок 9 – Зміна індуктивності генератора хаосу в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц

Експериментальна залежність добротності транзисторної структури наведено на рис. 10. Залежність SWR генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів наведена на рис.11.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

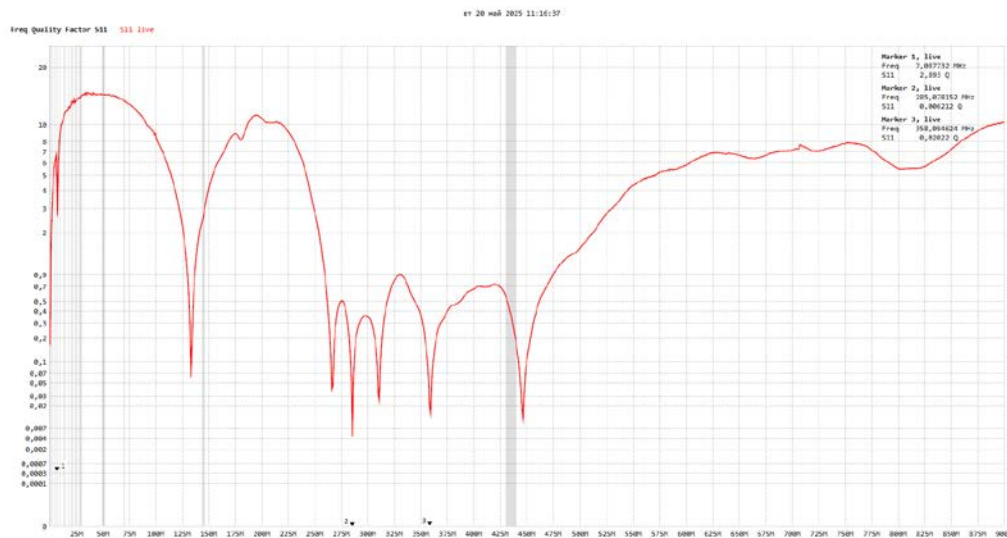


Рисунок 10 – Зміна добротності генератора хаосу в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц

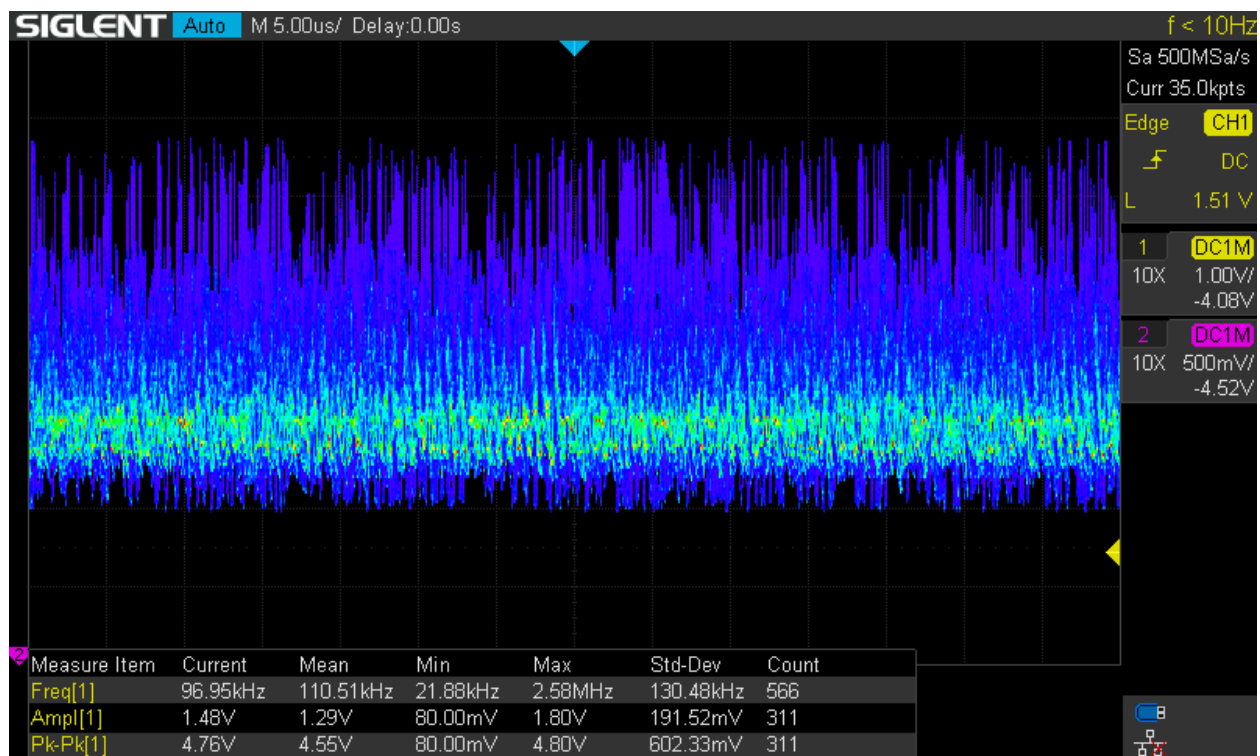


Рисунок 11 – Зміна SWR генератора хаосу в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц

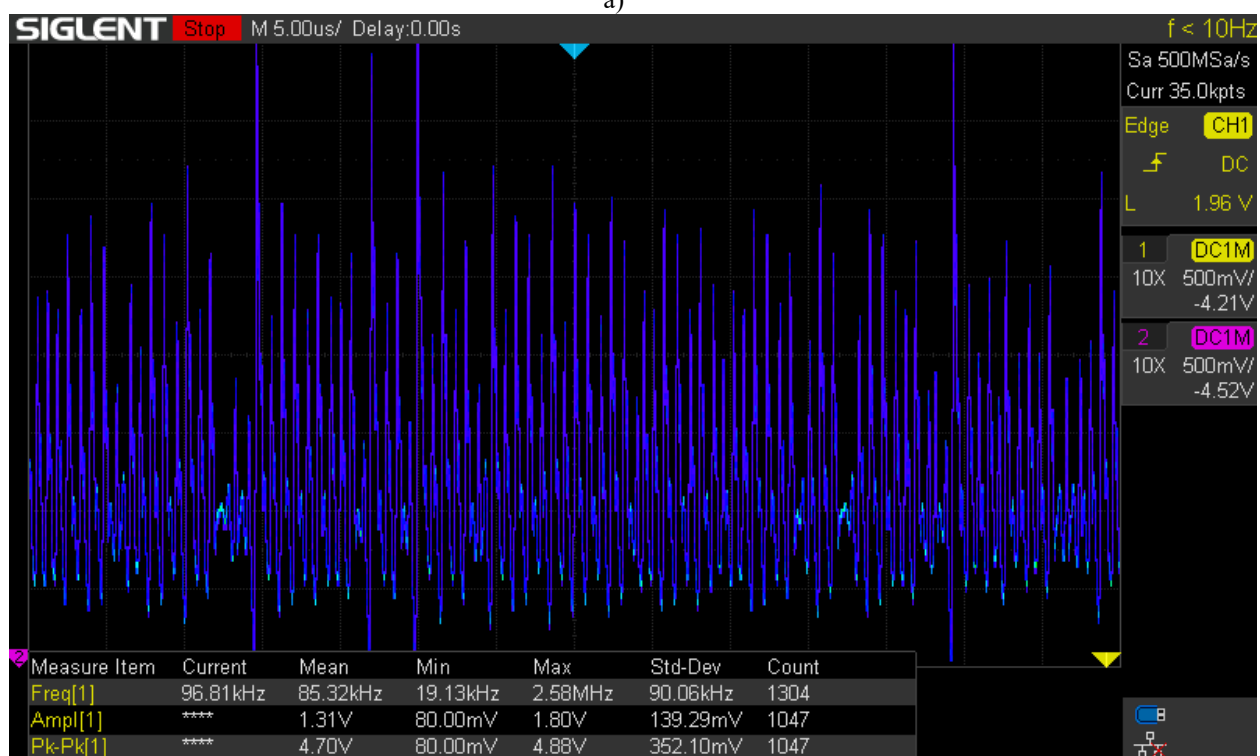
На рис.12 а, б представлені експериментальні осцилограми розробленого генератора хаосу при різних часових розгортках осцилографа. Частотний діапазон застосування генератора хаосу для передачі інформативного сигналу обрано від 2300 МГц до 2600 МГц це LTE-2600, Band 7, мобільний зв'язок та Wi-Fi діапазон частот застосовується для обладнання, що працює в частотному діапазоні від 2 ГГц до 3 ГГц (мобільний зв'язок, бездротовий інтернет, наземні термінали, системи Inmarsat, бездротова аудіо та відеоапаратура).

Експериментальні дослідження проведено за допомогою аналізатора радіочастотного спектру TinySA Ultra в програмі SpectroZir SA. На рис. 13 представлено радіочастотний спектр пристрою передачі сигналу з модуляцією генератором хаосу на біполярній транзисторній структурі з від'ємним диференціальним опором, частота несучої передачі складає 2425,0 МГц.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ



a)



б)

Рисунок 12 – Експериментальні осцилограми розробленого генератора хаосу при різних часових розгортках осцилографа

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ



Рисунок 13 – Спектр вихідного сигналу пристрою передавання на основі генератора хаосу в діапазоні від 2,3 ГГц до 2,55 ГГц

ВИСНОВОК

У роботі проведено експериментальне дослідження нового схемотехнічного рішення генератору детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності транзисторної структури між колекторами першого та другого біполярних транзисторів, а третя це струм, який протікає через індуктивність коливального контуру. Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Були проведені експериментальні дослідження від низьких частот до мікрохвильових частот для визначення оптимальних робочих частот для різних задач використання розробленого пристрою. Отримано ВАХ, діаграму Смита параметру S_{11} , імпеданс S_{11} , активну та реактивну складові повного опору, еквівалентну ємність та індуктивність, SWR генератора хаосу на основі двох біполярних транзисторів в діапазоні частот від 15 кГц до 1 ГГц. А також отримано експериментальні осцилограми розробленого генератора хаосу. У порівнянні з аналогами запропонований та досліджений генератор детермінованого хаосу має покращену навантажувальну здатність і вищу швидкодію має малий час встановлення стаціонарних коливань.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Magyari A., Chen Y. Review of State-of-the-Art FPGA Applications in IoT Networks. *Sensors* 2022, 22, 7496.
2. Hussain F., Hussain R., Hassan S.A., Hossain E. Machine Learning in IoT Security: Current Solutions and Future Challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 2020, 22, 1686–1721.
3. Dridi, F.; El Assad, S.; El Hadj Youssef, W.; Machhout, M.; Lozi, R. The Design and FPGA-Based Implementation of a Stream Cipher Based on a Secure Chaotic Generator. *Appl. Sci.* 2021, 11, 625.
4. Wang, X.Y.; Zhang, J.J.; Zhang, F.C.; Cao, G.H. New chaotical image encryption algorithm based on Fisher–Yates scrambling and DNA coding. *Chin. Phys. B* 2019, 28, 040504.
5. Belazi, A.; Abd El-Latif, A.A.; Belghith, S. A novel image encryption scheme based on substitution-permutation network and chaos. *Signal Process.* 2016, 128, 155–170.
6. Datcu, O.; Macovei, C.; Hobincu, R. Chaos based cryptographic pseudo-random number generator template with dynamic state change. *Appl. Sci.* 2020, 10, 451.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

7. Thakor, V.A.; Razzaque, M.A.; Khandaker, M.R. Lightweight cryptography algorithms for resource-constrained IoT devices: A review, comparison and research opportunities. *IEEE Access* 2021, 9, 28177–28193.
8. Sidiropoulos A, Konstantinidis D, Karamanos X, Mastos T, Apostolou K, Chatzis T, Papaspyropoulou M, Marini K, Karamitsos G, Theodoridou C, et al. A Novel Autonomous Robotic Vehicle-Based System for Real-Time Production and Safety Control in Industrial Environments. *Computers*. 2025; 14(5):188.
9. Sulaiman, A.G. Overview of ZUC Algorithm and its Contributions on the Security Success and Vulnerabilities of 4G Mobile Communication. *Int. J. Comput. Appl.* 2017, 975, 8887.
10. Ming, T.; PingPan, C.; ZhenLong, Q. Differential Power Analysis on ZUC Algorithm. *Cryptol. Eprint Arch.* (2023).
11. Dridi, F.; El Assad, S.; El Hadj Youssef, W.; Machhout, M.; Lozi, R. The Design and FPGA-Based Implementation of a Stream Cipher Based on a Secure Chaotic Generator. *Appl. Sci.* 2021, 11, 625.
12. Pareek, N.K.; Patidar, V.; Sud, K.K. Image encryption using chaotic logistic map. *Image Vis. Comput.* 2006, 24, 926–934.
13. François, M.; Grosgees, T.; Barchiesi, D.; Erra, R. Pseudo-random number generator based on mixing of three chaotic maps. *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* 2014, 19, 887–895.
14. Semenov A. O., Osadchuk O. V. Deterministic chaos generator with inertial nonlinearity based on a bipolar transistor structure with negative resistance. *Bulletin of the Vinnytsia Polytechnic Institute*. 2017. No. 6. pp. 147–152.
15. Andriy O. Semenov, Alexander V. Osadchuk, Iaroslav A. Osadchuk, Kosty-antyn O. Koval, Maksym O. Prytula. The Chaos Oscillator with Inertial Non-Linearity Based on a Transistor Structure with Negative Resistance. *17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2016*. Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July, 2016. Conference Proceedings, 2016. – P. 178–184.
16. Lin Y., Xie Z., Chen T., Cheng X., Wen H. Image privacy protection scheme based on high-quality reconstruction DCT compression and nonlinear dynamics. *Expert Syst. Appl.* 2024, 257, 124891.
17. Litvinenko A., Aboltins A., Pikulins D., Eidaks J. Frequency Modulated Chaos Shift Keying System for Wireless Sensor Network. *In Proceedings of the 2020 Signal Processing Workshop, SPW, Warsaw, Poland, 5–7 October 2020*.
18. Petrzela J., Chaotic States of Transistor-Based Tuned-Collector Oscillator. *Mathematics* 2023, 11, 2213.
19. Wang, L.; Wang, C.; Zhang, H.; Ma, P.; Zhang, S. Estimation-Correction Modeling and Chaos Control of Fractional-Order Memristor Load Buck-Boost Converter. *Complex Syst. Model. Simul.* 2024, 4, 67–81
20. Zhang, C.; Zhang, S.; Liang, K.; Chen, Z. Double Image Encryption Algorithm Based on Parallel Compressed Sensing and Chaotic System. *IEEE Access* 2024, 12, 54745–54757.
21. Kumar Thukral, M. SCLLCM: A Robust One Dimesional Chaotic Map for Image Encryption Application. *In Proceedings of the 2024 Asia Pacific Conference on Innovation in Technology (APCIT), Mysore, India, 26–27 July 2024; pp. 1–5*.
22. Zhang, J.; Qi, L. Detection of Weak Signals Based on the Duffing Chaotic System and FPGA Implementation. *In Proceedings of the 2024 5th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT), Nanjing, China, 29–31 March 2024; pp. 2212–2218*.
23. Anzo-Hernández A, Zambrano-Serrano E, Platas-Garza MA, Volos C. Dynamic Analysis and FPGA Implementation of Fractional-Order Hopfield Networks with Memristive Synapse. *Fractal and Fractional*. 2024; 8(11):628.
24. Petrzela J., Chaotic States of Transistor-Based Tuned-Collector Oscillator. *Mathematics* 2023, 11, 2213.
25. Petrzela J., Polak L. Minimal realizations of autonomous chaotic oscillators based on trans-immittance filters. *IEEE Access* 2019, 7, 17561–17577.
26. Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal*. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp). 2021.
27. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of a Frequency Pressure Transducer Based on a Resonant Tunneling Diode. *Physics and chemistry of solid state*. V.23, No. 2 (2022) pp.277-284.
28. Osadchuk I.A., Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Semenov A.O. Optical Sensor with Frequency Output Based on Resonant Tunneling Diode. *Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022, 2022, pp. 442-446*.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

29. Osadchuk V., Osadchuk A., Semenov A., Osadchuk I., Semenova O., Baraban S., Prytula M.. Radiomeasuring Optical-Frequency Transducers Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Data-Centric Business and Applications ICT Systems-Theory, Radio-Electronics, Information Technologies and Cybersecurity*, (Volume 5). Chapter 12. Springer International Publishing. Cham. Editors: Tamara Radivilova, Dmytro Ageyev, Natalia Kryvinska. 2020, pp.229-261.

Надійшла до редакції 27.04.25 р.

ОСАДЧУК ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, [e-mail: osadchuk.av69@gmail.com](mailto:osadchuk.av69@gmail.com)

ОСАДЧУК ЯРОСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, [e-mail: osadchuk.j93@gmail.com](mailto:osadchuk.j93@gmail.com)

ПЕТРЕНКО ВІТАЛІЙ ІВАНОВИЧ – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, [e-mail: kaf.rt.vntu@gmail.com](mailto:kaf.rt.vntu@gmail.com)

СКОЩУК ВАЛЕНТИН КОСТЯНТИНОВИЧ – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, [e-mail: skoschuk999@gmail.com](mailto:skoschuk999@gmail.com)

ШИКУН КОСТЯНТИН ВІТАЛІЙОВИЧ – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, [e-mail: shykumkv@gmail.com](mailto:shykumkv@gmail.com)

O.V. OSADCHUK, Ia.O. OSADCHUK, V.I. PETRENKO, V.K. SKOSCHUK K.V. SHYKUN

EXPERIMENTAL STUDY OF A DETERMINATIVE CHAOS GENERATOR BASED ON A TRANSISTOR STRUCTURE

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРІ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

УДК 621.382

О.В. ОСАДЧУК, Я.О.ОСАДЧУК, В.І. ПЕТРЕНКО, В.К. СКОЩУК

РОЗРОБКА ГЕНЕРАТОРА ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ НА ОСНОВІ ТРАНЗИСТОРНОЇ СТРУКТУРИ З ВІД'ЄМНИМ ОПОРОМ

Вінницький національний технічний університет, Хмельницьке шосе 95, 21021, м. Вінниця, Україна, e-mail:osadchuk.av69@gmail.com

Анотація. У роботі запропоновано та досліджено нове схемотехнічне рішення генератору детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Сфера передачі даних розширилася за останні роки завдяки швидкому розвитку комунікаційної інфраструктури, такої як мобільні та інтернет-мережі. Забезпечення безпечної передачі даних у електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладах і системах має вирішальне значення для підтримки безпеки та реалізації повного потенціалу цих інфокомунікаційних технологій. Серед перспективних розробок у безпеці фізичного рівня в передачі даних є інтеграція теорії хаосу, яка підвищує безпеку, використовуючи властиву хаотичним сигналам непередбачуваність. У роботі розглянута можливість отримання хаотичного режиму в напівпровідниковому генераторі на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності транзисторної структури між колекторами першого та другого біполярних транзисторів, а третя це струм, який протікає через індуктивність коливального контуру. Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Розроблено математичну модель генератора детермінованого хаосу у вигляді системи диференціальних рівнянь першого порядку на основі методу змінних стану, яка дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від напруги живлення та керування, а також параметрів основних елементів автогенератора в будь-якій точці схеми в заданий момент часу. За допомогою пакету програм MATLAB здійснено комп'ютерне схемотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань у хаотичному режимі. У порівнянні з аналогами запропонований та досліджений генератор детермінованого хаосу має покращену навантажувальну здатність і вищу швидкодію має малий час встановлення стаціонарних коливань.

Ключові слова: генератор детермінованого хаосу, автогенератор, детермінований хаос, транзисторна структура, від'ємний диференціальний опір.

Abstract. The paper proposes and investigates a new circuit solution for a deterministic chaos generator based on a bipolar transistor structure with negative differential resistance. The field of data transmission has expanded in recent years due to the rapid development of communication infrastructure, such as mobile and Internet networks. Ensuring secure data transmission in electronic communication and radio engineering devices and systems is crucial for maintaining security and realizing the full potential of these infocommunication technologies. Among the promising developments in physical-level security in data transmission is the integration of chaos theory, which increases security by using the unpredictability inherent in chaotic signals. The paper considers the possibility of obtaining a chaotic mode in a semiconductor generator based on a bipolar transistor structure with negative differential resistance. This chaos generator system has three dynamic variables: the voltage on the equivalent capacitance of the transistor structure between the collectors of the first and second bipolar transistors, and the third is the current flowing through the inductance of the oscillatory circuit. The dynamic processes of deterministic chaos are determined by the reactive properties of the transistor structure with negative differential resistance. A mathematical model of the deterministic chaos generator has been developed in the form of a system of first-order differential equations based on the state variable method, which allows determining the value of the output signal frequency depending on the supply and control voltages, as well as the parameters of the main elements of the oscillator at any point in the circuit at a given time. Using the MATLAB program package, a computer circuit engineering study of the parameters and characteristics of the generated electrical oscillations in a chaotic mode was carried out.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

In comparison with analogues, the proposed and investigated deterministic chaos generator has improved load capacity and higher speed, has a short time for establishing stationary oscillations.

Keywords: deterministic chaos generator, auto-oscillator, deterministic chaos, transistor structure, negative differential resistance.

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-247-256

ВСТУП

Сфера передачі даних розширилася за останні роки завдяки швидкому розвитку комунікаційної інфраструктури, такої як мобільні та інтернет-мережі [1]. Основною мотивацією для цього розвитку є полегшення контролю, збору та обробки інформаційних даних для промислових, аерокосмічних, військових, медичних, сільськогосподарських та багатьох інших застосувань, [2-6]. Збільшення об'ємів передачі й обробки даних та залежність від взаємопов'язаних пристроїв створює проблеми безпеки. Комп'ютерні системи та мережі за своєю суттю вразливі до широкого спектру загроз безпеці та атак.

Детермінований хаос це досить поширене явище, яке спостерігається в динамічних системах з неперервним часом, що описуються нелінійними диференціальними рівняннями. Хаотичні системи є важливими в широкому спектрі застосувань, включаючи, але не обмежуючись, моделювання роботів, керування рухом [6], а також генерацію випадкових чисел і шифрування [7]. Хаотичні системи мають кілька переваг, таких як чутливість до параметрів і початкових умов. Крім того, неперіодична природа хаотичних систем робить їх ідеальними для використання в системах шифрування [8, 9].

Використання хаотичної криптографії для захисту інформативних сигналів було запропоновано для вирішення численних проблем безпеки комп'ютерних систем і мереж загального та спеціального призначення [8 – 10].

АНАЛІЗ ОСТАННІХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Серед перспективних розробок у безпеці фізичного рівня в передачі даних є інтеграція теорії хаосу, яка підвищує безпеку, використовуючи властиву хаотичним сигналам непередбачуваність. Методи зв'язку на основі хаосу пропонують досить гарні рішення для безпечної передачі даних, особливо в сенсорних мережах Інтернету речей та комп'ютерних системах спеціального призначення, де пристрої мають обмежені обчислювальні та енергетичні ресурси [11].

Квантові кроки мають переваги детермінізму та високої чутливості до початкових умов. Ці характеристики створюють можливості для нового підходу до квантових хеш-функцій, матриць заміщення та генераторів псевдовипадкових чисел. Ці компоненти є невід'ємною частиною реалізації протоколів квантового шифрування та автентифікації. Авторами, у роботі [12] запропонована матриця заміщення, яка отримана з серії випадкових значень, згенерованих шляхом виконання одновимірних одночастинкових квантових кроків на круговому шляху. Потім вони були розташовані в послідовному порядку, причому індекси їхніх відповідних позицій зрештою склали матрицю заміщення. Чотиривимірна багатопрокрутка модифікована нейронна мережа Хопфілда, що використовує поліноми знакової функції [13]. У роботі [14] автори розробили інноваційний мемристор, що включає мемпроекцію полінома знакової функції. Дослідники включили його в модель Ходжкіна-Хакслі, створивши мемристивну систему, яка може генерувати багатопрокруткові аттрактори.

Однак хаотичні системи є детермінованими, що означає, що динаміка системи не є випадковою, як шум, і тому може бути контрольовано використана. Хаотичні системи базуються на нелінійності та можуть мати різні фізичні реалізації. У літературі осцилятори хаосу - це малопотужні аналогові схеми, які демонструють хаотичну поведінку та спеціально розроблені для роботи як джерело хаотичних сигналів [11-13].

Метою роботи є розробка та дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, в якому втрати енергії в коливальній системі компенсуються енергією диференційного від'ємного опору.

ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Схемотехнічні рішення напівпровідникових генераторів детермінованого хаосу повинні бути достатньо простими, щоб їх можна було синхронізувати. Особливістю генерування та формування сигналів детермінованого хаосу аналоговими пристроями є використання їхніх нелінійних статичних або динамічних характеристик. Простота схемних рішень напівпровідникових генераторів детермінованого

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

хаосу є необхідною умовою для зменшення нестабільностей в роботі електронно-комунікаційних та радіотехнічних приладів, систем і мереж.

В ході аналізу вибору оптимального варіанта схемотехнічного рішення генератора детермінованого хаосу для телекомунікаційних та радіотехнічних пристроїв і систем, доцільно використовувати частотний метод перетворення інформаційного сигналу, який дозволяє підвищити вихідну потужність генератора хаосу, а також розширити частотний діапазон генерованого хаотичного сигналу [15-18]. Теоретичні дослідження показали, що в якості схем автогенераторів детермінованого хаосу доцільно використовувати схемотехнічні рішення генераторних схем на основі реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором [19 – 23], які реалізують частотний принцип перетворення інформативного сигналу. Від'ємний опір забезпечується внутрішнім зворотним зв'язком біполярної транзисторної структури і слугує компенсацією втрат енергії в коливальному контурі. Імпеданс такої біполярної транзисторної структури, в залежності від виду його вольт-амперної характеристики, носить ємнісний або індуктивний характер, а його величина залежить від напруги живлення та керування.

У роботі розглянута можливість отримання хаотичного режиму в напівпровідниковому генераторі на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, електрична схема якого представлена на рис. 1. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності транзисторної структури між колекторами першого та другого біполярних транзисторів VT1 та VT2, а третя це струм, який протікає через індуктивність L1.

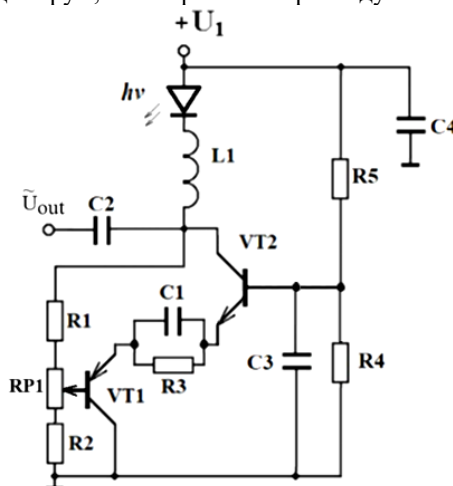


Рисунок 1 – Електрична схема генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури

Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Для зміни динаміки хаотичних коливань, а також розширення фазового простору, додано послідовний ланцюг з резистора R4 та ємності C3, до індуктивної вітки базової схеми генератора на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором також додано коло з послідовно включених світловипромінюючим діодом. Для термостабілізації роботи генератора детермінованого хаосу введено ланцюг з паралельного включення ємності C1 та резистора R3. Номінали електронних компонентів обираються з наступних міркувань це забезпечення максимальної протяжності спадаючої ділянки статичної вольт-амперної характеристики транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором та забезпечення широкої зміни еквівалентної ємності самої транзисторної структури.

Генерована хаотична напруга знімається із колектора біполярного транзистора VT2. В даному випадку хаотична динаміка контролюється зміною напруги на базі біполярного транзистора підстроювальним резистором RP1. Під час підключення опору навантаження, необхідно враховувати внесений нею активний та реактивний опір до коливального контуру генератора хаоса на основі біполярної транзисторної структури. Застосування світлодіоду дозволяє здійснити гальванічну розв'язку виходу генератору детермінованого хаосу з навантаженням. У цьому випадку генератор працює в режимі холостого ходу по основному виходу, що дозволяє широко його використовувати у схемах електронно-комунікаційних та радіотехнічних пристроїв та систем. Сімейство експериментальних статичних та

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

динамічних вольт-амперних характеристик генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором подано на рис.2.

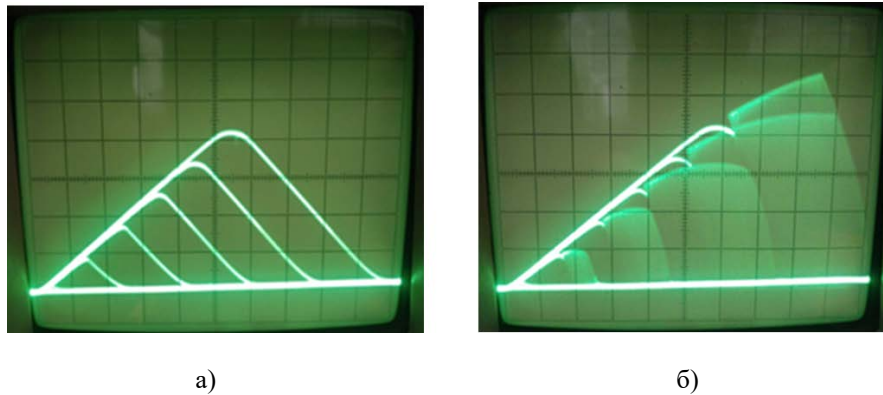


Рисунок 2 – Сімейство експериментальних статичних (а) та динамічних (б) ВАХ генератора детермінованого хаосу (по вертикальній осі одна поділка – 1мА, а по горизонтальній осі – 1В)

Коло з резистора R5 та конденсатора C3 створює додатний зворотній зв'язок виходу генератора детермінованого хаосу з входом, що збільшує диференціальний від'ємний опір у коливальній системі пристрою. Конденсатор C4 запобігає проходженню змінного струму через джерело напруги U1. Для аналізу статистичних характеристик генерованих хаотичних імпульсів розроблена математична модель, подальші обчислення якої здійснені в MATLAB R2018a.

Для побудови математичної моделі генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури застосовано метод змінних стану, який дозволяє визначити значення напруг і струмів елементів кола в кожний момент часу. З метою розгляду властивостей запропонованої схеми і створення її математичної моделі, було створено нелінійну еквівалентну схему. Обравши напрямки обходу контурів і позначивши відповідні струми, розроблено систему рівнянь за законами Кірхгофа. Отриману систему рівнянь використано для аналізу схеми методом змінних стану.

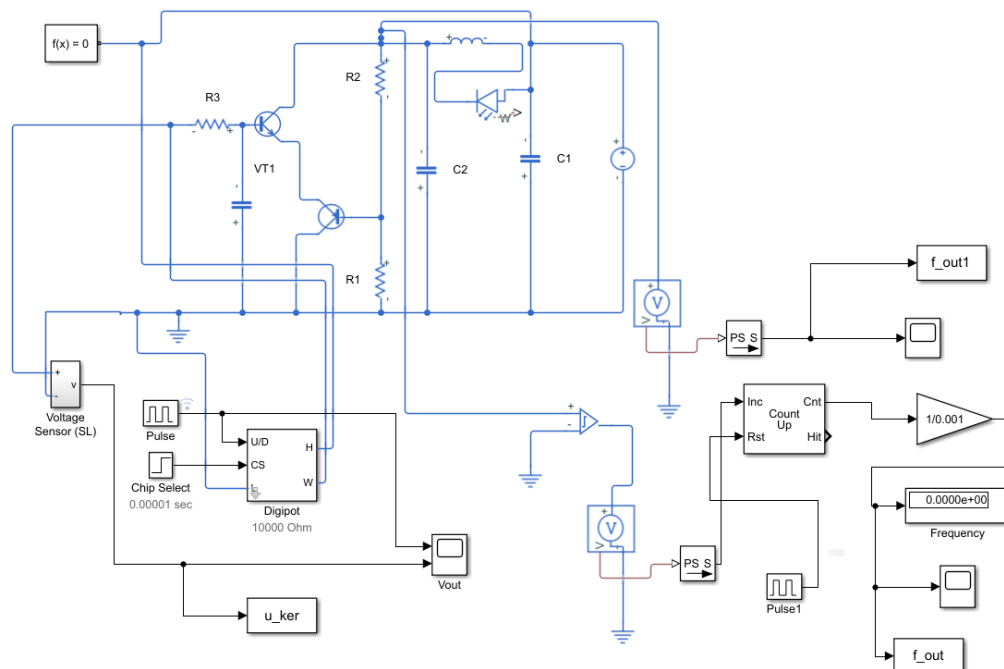


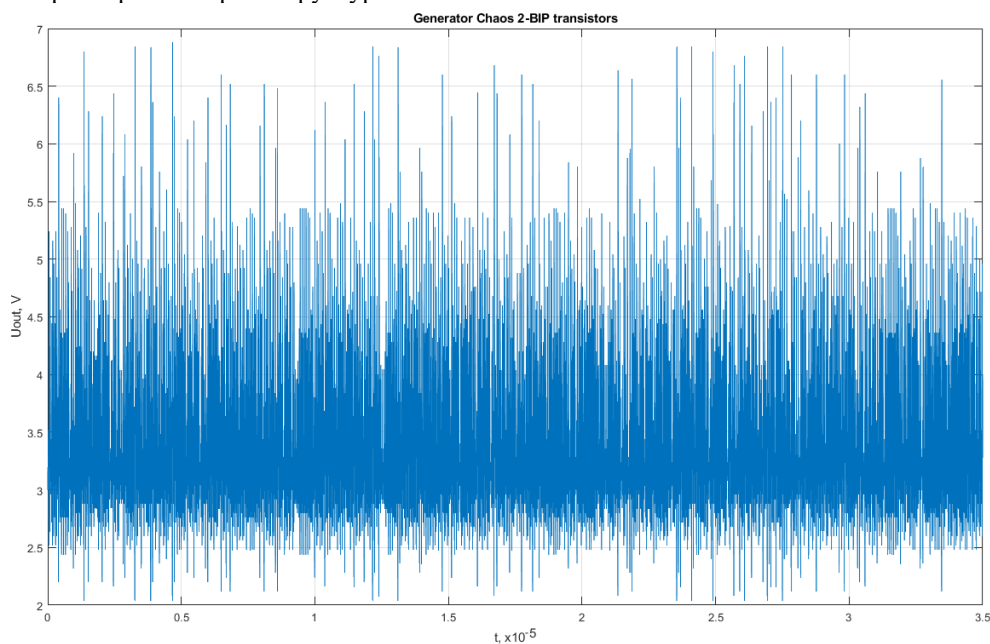
Рисунок 3 – Схема генератор детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури для моделювання динамічних характеристик

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

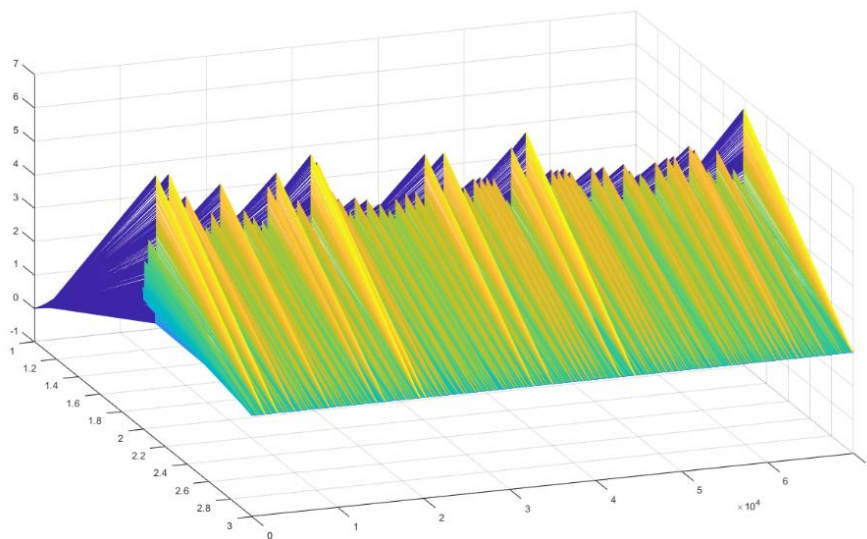
Хаос можна описати як випадковий вихідний сигнал, який можна змодельовати та відтворити за допомогою певної системи рівнянь, якщо початкові умови відомі. Виходи хаотичних систем, дуже чутливі до початкових умов системи, причому незначні коливання призводять до різких змін у вихідній моделі. Хаотичні системи формально визначаються як такі, що мають принаймні один додатний показник Ляпунова. Показник Ляпунова кількісно визначає швидкість розділення нескінченно близьких траєкторій. Іншими словами, хаотична система буде відхилятися між кількома ітераціями з малими збуреннями.

Динамічна модель генератора детермінованого хаосу дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від напруги керування, а також параметрів основних елементів автогенератора в будь-який момент часу. За допомогою пакету програм MATLAB Simulink [24] здійснено комп'ютерне схемотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань у хаотичному режимі (рис.3).

На рис.4 представлено промодельований вихідний сигнал генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури.



а)



б)

Рисунок 4 – Промодельований вихідний сигнал генератора детермінованого хаосу а) 2D; б) 3D

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

За допомогою Signal Processing Toolbox проведено спектральний аналіз розробленого генератора детермінованого хаосу, які дозволяють характеризувати частотний склад сигналу. Непараметричні методи на основі швидкого перетворення Фур'є, параметричні та підпросторові методи враховують попереднє знання сигналу і достатньо точно описують поведінку генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури. Обчислені спектри потужності нерівномірно дискретизованих сигналів представлені на рис.4. Промодельована подібність сигналу у частотній області, оцінюючи їх спектральну когерентність, що дозволило візуалізувати та порівняти часово-частотний склад нестационарних сигналів. Отримано точні спектральні оцінки за допомогою перепризначення та синхронізаційного стискання Фур'є. На рис.5 представлені крос-спектрограми, розподілу Вігнера-Вілля та спектри персистенції. Оцінено спектральну потужність в часово-частотному представленні сигналу (рис.6), миттєву частоту, миттєву ширину смуги пропускання (рис.7), спектральний ексцес та спектральну ентропію.

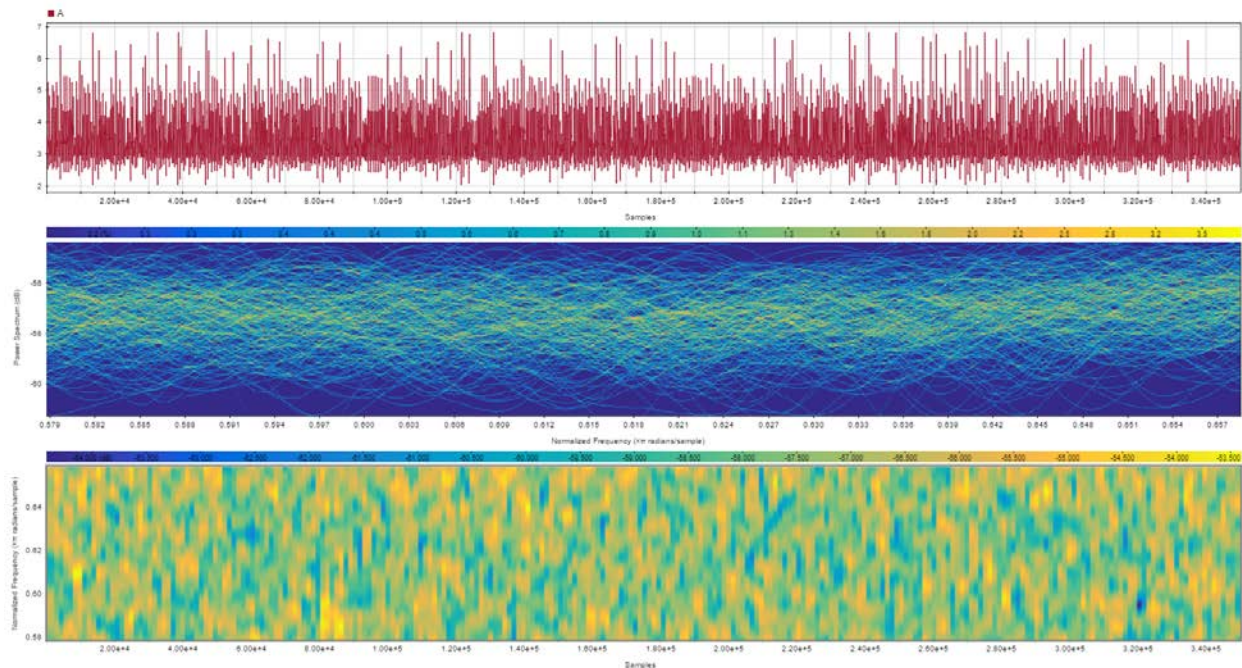


Рисунок 5 – Крос-спектрограми розподілу Вігнера-Вілля та спектри персистенції

Фундаментальна характеристика динамічного хаотичного сигналу, а саме подібність до розширеного спектру, має кілька корисних властивостей для електронно-комунікаційних та радіотехнічних систем [25]. Загалом, його наявність важко виявити, і, отже, його легко приховати від неавторизованих приймачів. Крім того, важко перехопити переданий хаотичний сигнал, і він стійкий до глушіння [26]. Крім того, він пропонує певну стійкість до спотворень через багатопроменеве поширення, що можна пояснити нижчою взаємною кореляцією між двома зміщеними в часі сегментами хаотичної форми сигналу порівняно з періодичними сигналами [26]. Генеруючий хаотичний широкосмуговий сигнал має щільний набір нестабільних періодичних орбіт, які пропонують діапазон частот, що утворюють плоску функцію щільності ймовірності, що означає, що хаотичні системи використовують вхідну енергію для генерації шумоподібних широкосмугових сигналів. Це гарна властивість для передавального сигналу, особливо якщо врахувати вхідну енергію, що забезпечується зовнішніми збуреннями, а саме мультиплікативним шумом, присутнім у каналі передачі, тому були проведені експериментальні дослідження спектрів вихідного сигналу генератора хаосу на основі транзисторної структури з від'ємним опором.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

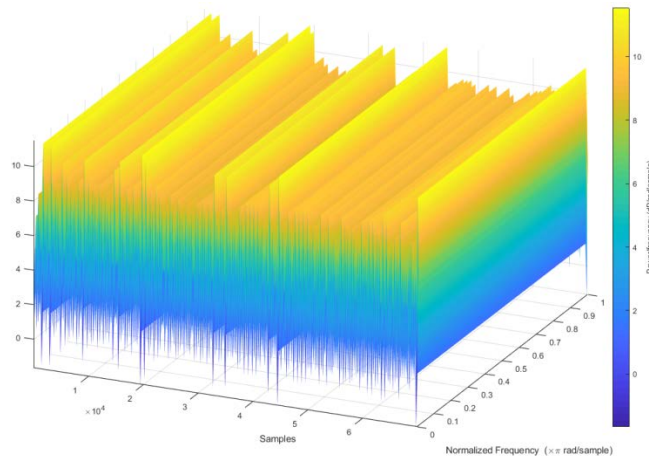


Рисунок 6 – 3D спектральна потужність в часово-частотному представленні сигналу

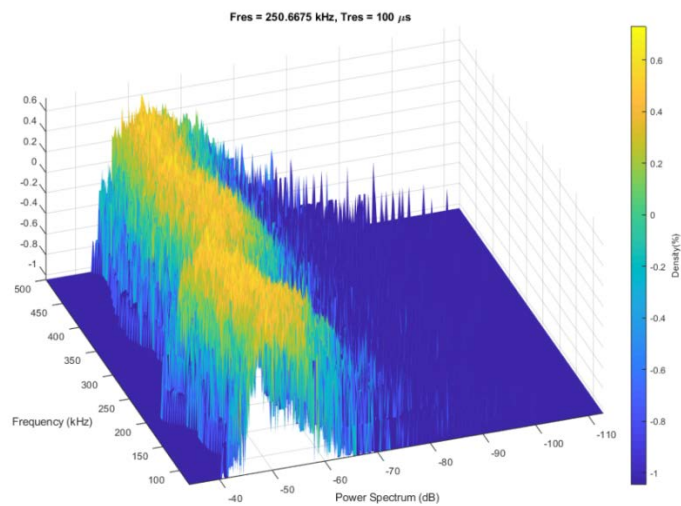


Рисунок 7 – Миттєва ширина смуги пропускання в часово-частотному представленні сигналу

Проведені експериментальні дослідження генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором показали, що дане схемотехнічне рішення дозволяє зменшити час встановлення стаціонарних коливань та розширити частотний діапазон хаотичних коливань. На рис.8 представлено фазовий портрет генератора у площині динамічних змінних. На рис.9 наведені експериментальні осцилограми хаотичних коливань генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури.

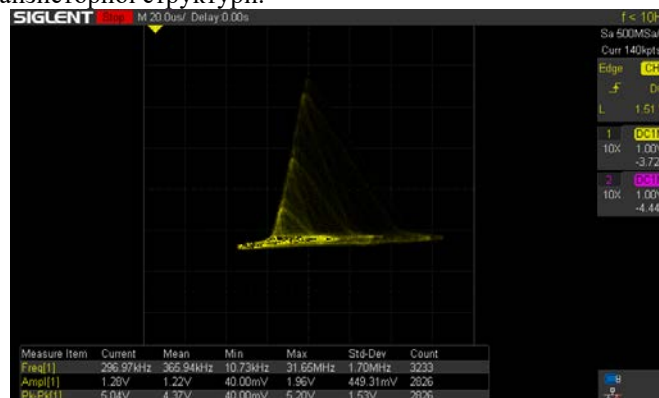
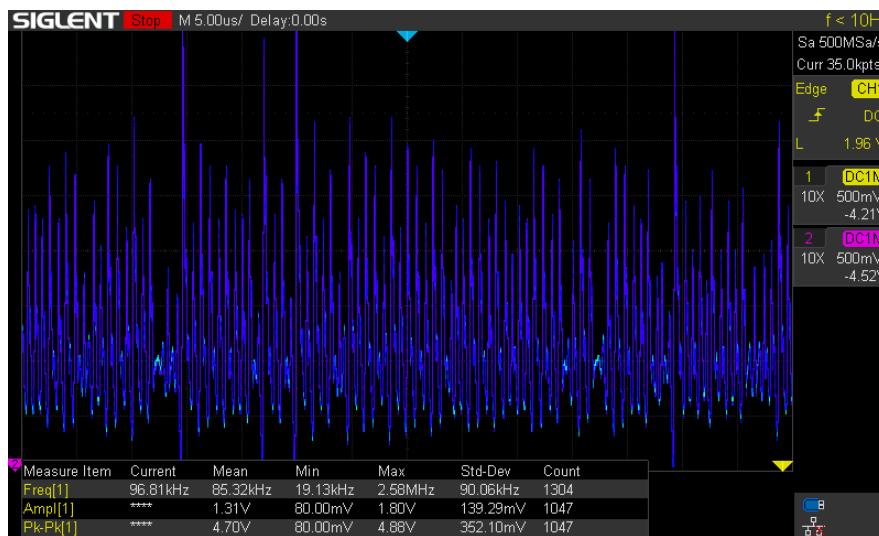
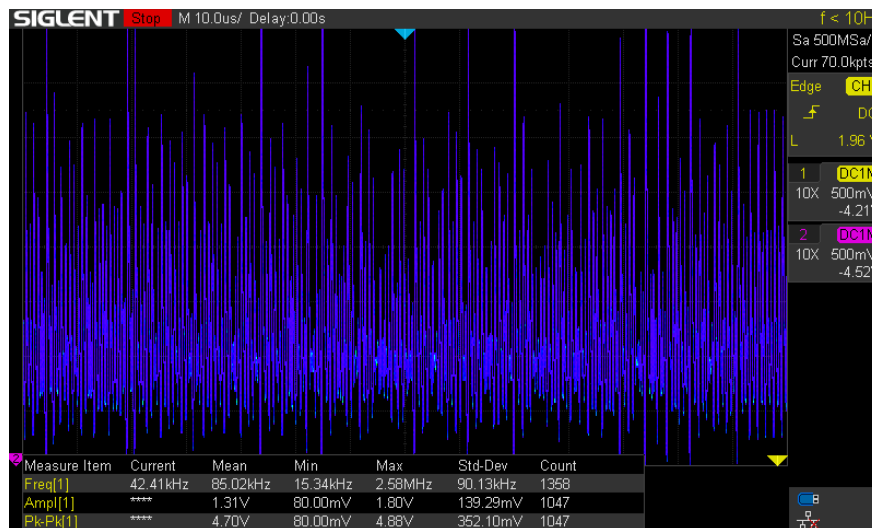


Рисунок 8 – Фазовий портрет генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури у площині динамічних змінних

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ



a)



b)

Рисунок 9 – Осцилограми генератора детермінованого хаосу: а) напруга живлення 5 В, напруга керування 2,5 В; б) напруга живлення 5 В, напруга керування 3,5 В

ВИСНОВКИ

У роботі запропоновано та досліджено нове схмотехнічне рішення генератора детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Дана система генератора хаосу має три динамічні змінні: напруга на еквівалентній ємності транзисторної структури між колекторами першого та другого біполярних транзисторів, а третя це струм, який протікає через індуктивність коливального контуру. Динамічні процеси детермінованого хаосу визначаються реактивними властивостями транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором. Розроблено математичну модель генератора детермінованого хаосу у вигляді системи диференціальних рівнянь першого порядку на основі методу змінних стану, яка дозволяє визначити значення частоти вихідного сигналу в залежності від напруги живлення та керування, а також параметрів основних елементів автогенератора в будь-якій точці схеми в заданий момент часу. За допомогою пакету програм MATLAB здійснено комп'ютерне схмотехнічне дослідження параметрів і характеристик генерованих електричних коливань у хаотичному режимі. У порівнянні з аналогами запропонований та досліджений генератор детермінованого хаосу має покращену навантажувальну здатність і вищу швидкодію має малий час встановлення стаціонарних коливань.

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ / REFERENCES

1. Magyari A., Chen Y. Review of State-of-the-Art FPGA Applications in IoT Networks. *Sensors* 2022, 22, 7496.
2. Hussain F., Hussain R., Hassan S.A., Hossain E. Machine Learning in IoT Security: Current Solutions and Future Challenges. *IEEE Commun. Surv. Tutorials* 2020, 22, 1686–1721.
3. Rawat D.B., Doku R., Garuba M. Cybersecurity in Big Data Era: From Securing Big Data to Data-Driven Security. *IEEE Trans. Serv. Comput.* 2021, 14, 2055–2072.
4. Sychowiec J., Zieliński Z. A Blockchain-Based Framework for Secure Data Stream Dissemination in Federated IoT Environments. *Electronics*. 2025; 14(10):2067. <https://doi.org/10.3390/electronics14102067>
5. Sidiropoulos A, Konstantinidis D, Karamanos X, Mastos T, Apostolou K, Chatzis T, Papaspyropoulou M, Marini K, Karamitsos G, Theodoridou C, et al. A Novel Autonomous Robotic Vehicle-Based System for Real-Time Production and Safety Control in Industrial Environments. *Computers*. 2025; 14(5):188. <https://doi.org/10.3390/computers14050188>
6. Vaseghi, B.; Pourmina, M.A.; Mobayen, S. Finite-time chaos synchronization and its application in wireless sensor networks. *Trans. Inst. Meas. Control* 2018, 40, 3788–3799.
7. Sun P., Shen S., Wan Y., Wu Z., Fang Z., Gao X.Z. A Survey of IoT Privacy Security: Architecture, Technology, Challenges, and Trends. *IEEE Internet Things J.* 2024, 11, 34567–34591.
8. Sauter T., Treytl A. IoT-Enabled Sensors in Automation Systems and Their Security Challenges. *IEEE Sensors Lett.* 2023, 7, 1–4.
9. Cirjulina D., Babajans R., Kolosovs D. Design Particularities of Quadrature Chaos Shift Keying Communication System with Enhanced Noise Immunity for IoT Applications. *Entropy*. 2025; 27(3):296.
10. Kaddoum G., Tadayon N. Differential Chaos Shift Keying: A Robust Modulation Scheme for Power-Line Communications. *IEEE Trans. Circuits Syst. II* 2017, 64, 31–35.
11. Lin Y., Xie Z., Chen T., Cheng X., Wen H. Image privacy protection scheme based on high-quality reconstruction DCT compression and nonlinear dynamics. *Expert Syst. Appl.* 2024, 257, 124891.
12. Ludovico Minati. Atypical transistor-based chaotic oscillators: Design, realization, and diversity / Ludovico Minati, Mattia Frasca, Paweł Oświęcimka, Luca Faes, Stanisław Drożdż. *CHAOS*. – 2017. – Vol. 27, 073113 (2017). – pp. 073113-1 – 073113-13.
13. Saber A. Security Analysis of Chaos Based Communication Systems; Carleton University: Ottawa, ON, Canada, 2007.
14. Anzo-Hernández A, Zambrano-Serrano E, Platas-Garza MA, Volos C. Dynamic Analysis and FPGA Implementation of Fractional-Order Hopfield Networks with Memristive Synapse. *Fractal and Fractional*. 2024; 8(11):628. <https://doi.org/10.3390/fractalfract8110628>
15. Litvinenko A., Aboltins A., Pikulins D., Eidaks J. Frequency Modulated Chaos Shift Keying System for Wireless Sensor Network. In *Proceedings of the 2020 Signal Processing Workshop, SPW*, Warsaw, Poland, 5–7 October 2020.
16. Petrzela J., Chaotic States of Transistor-Based Tuned-Collector Oscillator. *Mathematics* 2023, 11, 2213.
17. Petrzela J., Polak L. Minimal realizations of autonomous chaotic oscillators based on trans-immittance filters. *IEEE Access* 2019, 7, 17561–17577.
18. Valencia-Ponce M.A., Tlelo-Cuautle E., Gerardo de la Fraga L. Estimating the highest time-step in numerical methods to enhance the optimization of chaotic oscillators. *Mathematics* 2021, 9, 1938.
19. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletska O.O., Piotr Kisała, Karlygash Nurseitova. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. *Proc. SPIE 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 111761I, pp.1-12. 2019.
20. Osadchuk O.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance. *Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal*. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp). 2021.
21. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of a Frequency Pressure Transducer Based on a Resonant Tunneling Diode. *Physics and chemistry of solid state*. V.23, No. 2 (2022) pp.277-284.
22. Osadchuk I.A., Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Semenov A.O. Optical Sensor with Frequency Output Based on Resonant Tunneling Diode. *Proceedings - 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2022*, 2022, pp. 442-446.
23. Osadchuk V., Osadchuk A., Semenov A., Osadchuk I., Semanova O., Baraban S., Prytula M.. Radiomeasuring Optical-Frequency Transducers Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential

ОПТИЧНІ ТА ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ І ПЕРЕТВОРЮВАЧІ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ТА ЕКОЛОГІЧНОГО МОНІТОРИНГУ

- Resistance. *Data-Centric Business and Applications ICT Systems-Theory, Radio-Electronics, Information Technologies and Cybersecurity*, (Volume 5). Chapter 12. Springer International Publishing, Cham. Editors: Tamara Radivilova, Dmytro Ageyev, Natalia Kryvinska. 2020, pp.229-261.
24. <https://uk.mathworks.com/help/simulink/index.html>
25. Marc M. Sepantaie, Nader M. Namazi, and Amir M. Sepantaie. Spectral analysis and implementation of secure chaotic free-space optical communication systems. *Optical Engineering* 57(10), 106101 (5 October 2018).
26. Shi, B.; Sui, T.; Zhang, T.; Jiang, Q. A Spread Spectrum Parameter Optimization Analysis for Differential Chaotic Shift Keying. In *Proceedings of the ICMLCA 2021 2nd International Conference on Machine Learning and Computer Application*, Shenyang, China, 17–19 December 2021; Volume 9, pp. 7–11.

Надійшла до редакції 27.04.25 р.

ОСАДЧУК ОЛЕКСАНДР ВОЛОДИМИРОВИЧ – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: osadchuk.av69@gmail.com**

ОСАДЧУК ЯРОСЛАВ ОЛЕКСАНДРОВИЧ – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: osadchuk.j93@gmail.com**

ПЕТРЕНКО ВІТАЛІЙ ІВАНОВИЧ – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: kaf.rt.vntu@gmail.com**

СКОЩУК ВАЛЕНТИН КОСТЯНТИНОВИЧ – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем, Вінницький національний технічний університет, **e-mail: skoschuk999@gmail.com**

O.V. OSADCHUK, Ia.O. OSADCHUK, V.I. PETRENKO, V.K. SKOSCHUK

DEVELOPMENT OF A DETERMINATIVE CHAOS GENERATOR BASED ON A TRANSISTOR STRUCTURE WITH NEGATIVE RESISTANCE

Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, Ukraine

УДК 004.4 + 004.8

R.V. SLOBODIAN, I.V. BOGACH

CUSTOMER SUPPORT PROCESS PROBLEMS AND THEIR ALL-IN-ONE RESOLUTION

*Vinnitsia National Technical University, 21005,
6 Ak. Yuschenko str., Vinnitsia, Ukraine, e-mail: romich.prof@gmail.com*

Анотація. У цій статті розглядаються важливі аспекти вдосконалення систем підтримки клієнтів з метою їх упорядкування шляхом інтеграції передових обчислювальних методів і автоматизації. Ефективне використання обчислювальних систем у різних галузях, таких як наука, бізнес і техніка, значною мірою залежить від високоякісних даних і складної обробки. Чітко організовані дані та чітко визначені завдання є важливими для підвищення ефективності системи підтримки клієнтів. В дослідженні підкреслюється, що поточні впровадження часто не охоплюють повний спектр сценаріїв. Ефективне використання інструментів для динамічного управління робочим навантаженням та перевірки даних у режимі реального часу створює значні труднощі. Необхідні інтегровані рішення для обробки всього життєвого циклу запитів на підтримку клієнтів – від збору даних до розподілу завдань і, нарешті, до управління навичками агентів на основі відгуків клієнтів. Цілісний підхід з використанням штучного інтелекту та машинного навчання може покращити управління завданнями в підтримці клієнтів, що призведе до кращої якості даних, ефективного розподілу завдань та підвищення продуктивності агентів.

Ключові слова: процес підтримки клієнтів, операції підтримки клієнтів

Abstract. This paper examines the critical aspects of enhancing Customer Support Systems with an aim to have them sorted out by integrating advanced computational techniques and automation. Efficient use of computational Systems across various fields, such as science, business, and engineering, relies heavily on high-quality data and sophisticated processing. Clearly organized data and well-defined tasks are essential for maximizing Customer Support System effectiveness. The study highlights that current implementations often fail to cover end-to-end scenarios comprehensively. Effective use of tools for dynamic workload management and real-time data validation presents significant challenges. Integrated solutions are needed to handle the entire lifecycle of customer support requests - from data gathering to task allocation, and finally, to managing agents' skills based on customer reviews. A holistic approach using AI and machine learning can improve task management in customer support, resulting in better data quality, efficient task distribution, and enhanced agent performance.

Key words: customer support process, customer support operations

DOI: 10.31649/1681-7893-2025-49-1-257-263

INTRODUCTION

Have your Customers ever experienced frustrating delays? Waiting hours or even days for someone to get back to them when they faced a technical issue, making a reservation, or submitting a service complaint? While such delays might be tolerable for minor issues, they can be disastrous in more severe cases.

Unresolved and/or even unanswered problems can lead to widespread social media complaints, hazards could result in injuries, and poor service might drive Customers to switch to competitors. The consequences can be significant, as seen in the case of Fisker, where delayed responses to Customer's concerns led to reputational damage and stock share price declines from \$0.73 to \$0.0023 which is an insane 99.69% decline [[InsideEVs](#), [Reuters](#)].

АЛТЕРНАТИВНІ НАУКОВІ ІДЕЇ ТА ГІПОТЕЗИ

Delays in Customer Support are often caused by the lack of efficient processes and necessary automations within Companies processes. When multiple Agents must transfer requests from one to another, trying to find someone who actually understands the issue, it creates a frustrating experience for the Customers who are left on their own. For instance, popular online Sales Platform Support suggests that they will be able to get back in touch after an unsuccessful payment complaint in around 48h as visible on the figure 1, attached below.

Thank you so much for waiting, I was able to send an escalation for your concern and rest assured that you will receive an email update within 48 hours and we will help you with that. I can assure you that our team is working on it and I will support you on this.

Figure 1 – Complaint escalation request

The lack of automation not only prolongs response times but also increases the likelihood of errors and miscommunication, further contributing to the problem, and potential revenue losses.

The paper "Priority-Based Scheduling Algorithm for Help Desk Support System" explains how priority-based scheduling algorithms improve task allocation by dynamically prioritizing support tickets based on urgency and complexity. This ensures that high-priority issues are handled by the most suitable agents, maximizing resource utilization and improving service efficiency [IJISAE].

At the same time, it's important to acknowledge that sometimes Customer requests are vague and not clearly described, making it difficult for Support Teams to address the issues effectively. Customers may struggle to articulate their problems, especially when they don't know what information is relevant. This lack of clarity leads to even more frustration for both, Customers who are waiting for a solution and Support Agents who are struggling figuring out what's going on [Dynamic Business].

Also, clear guidelines and objectives ensure coherent and focused data collection efforts, which are crucial for accurately assessing educational quality and learning outcomes. For instance, clear task definitions facilitated better coordination among stakeholders, enhancing the effectiveness of data integration into policy-making processes [UNESCO IIEP Learning Portal].

Quality problem may be modeled by considering the quality of task descriptions (TDQ) as a variable that affects task resolution time and accuracy:

$$TDQ = f(TD),$$

where TD represents task description, and f is a function that evaluates their clarity and completeness.

Impact on the task resolution time (TRT) and accuracy (A) may be modeled using functions below:

$$\begin{aligned} TRT &= g(TDQ), \\ A &= h(TDQ), \end{aligned}$$

where g and h are functions which describe how the task description quality affects resolution time and accuracy.

Ensuring that high-quality data is gathered is a prerequisite for any kind of automation in Customer Support. Automation relies on accurate and complete data to function effectively, whether it's for routing tasks to the appropriate Agents, providing relevant information to Customers via chatbots, or analyzing trends to predict and resolve issues proactively. Without quality data, automated systems may make incorrect decisions, leading to inefficiencies and Customer dissatisfaction. Therefore, addressing the root causes of data quality issues is essential for the successful implementation of automated Solutions in Customer Support.

But is there really a need to reach out to a Support Team for every issue? Perhaps some problems could be resolved by customers themselves by following simple instructions or knowledge articles. For instance, when a device displays an error code, the solution might be as simple as connecting a charging adapter or performing basic maintenance. In such cases, waiting for a support agent not only frustrates the Customer but also ties up valuable Company resources.

A potential resolution of the above challenge is the implementation of robust Self-Service options that empower Customers to solve straightforward issues on their own. By offering tools like Chatbots, Knowledge Bases, or Online forms where Customers can be guided which information to enter while searching for solutions, Companies can significantly reduce the demand on their Support Teams. These self-service tools can instantly deliver the necessary information, guiding customers through the steps to resolve their issues without needing Agent intervention [Help Scout].

АЛТЕРНАТИВНІ НАУКОВІ ІДЕЇ ТА ГІПОТЕЗИ

Summarizing above, it is clear that in any Customer Support environment, challenges and issues are inevitable. Whether it's due to vague customer requests, delays in response times, or the sheer complexity of certain problems, no System is perfect. Given this landscape, a well-defined, all-in-one process is essential. Such a process should streamline the issues resolution, whether they are handled by Customers independently or require the expertise of a Support Agent.

Also, it becomes obvious that there are struggles of defining and implementing one because if it would not be a case, then there would be happy Customers only!

CUSTOMER SUPPORT TOOLS OVERVIEW

With a clear understanding of the key challenges in Customer Support (various delays, vague requests, and the lack of Self-Service options) it is now time to explore the tools and platforms available to address them.

The question we must ask ourselves is: Are there solutions flexible enough to implement even the most complex customer support processes and meet the highest demands? To find out the answer, let's do some research of what we are offered.

At first glance, it may seem that a variety of tools, such as CRM systems, chatbots, and AI, can be utilized to implement Customer Support processes effectively, potentially creating a comprehensive Solution. However, while using these standalone instruments might work well initially, the challenge arises when trying to integrate them into a seamless, unified System. As the complexity of the Customer Support process grows, so does the difficulty of ensuring that these disparate tools work together harmoniously. For instance, combining a CRM with separate AI-driven Chatbots and data validation instruments can lead to issues with data synchronization, workflow management, and user experience consistency.

For instance, one of the major issues is the heterogeneity of Systems and data formats, which can create compatibility problems. Different tools often have unique architectures and data storage methods, making it difficult to achieve a smooth integration. This complexity can lead to increased costs, longer development times, and a higher likelihood of errors during the integration process [[Connecting Software](#)].

Additionally, maintaining consistent performance and scalability becomes more challenging as you integrate multiple tools. As your Business grows, the integration infrastructure may struggle to handle the increased workload, leading to slow data processing and reduced efficiency. This problem is extended by the need to maintain Security and Compliance across disparate Systems, each with its own set of vulnerabilities and regulatory requirements [[Connecting Software](#)].

Table 1

Popular Platforms that implement Customer Support processes

		Platform		
		Zendesk	Freshdesk	Salesforce
FEATURE	Ticketing System	Comprehensive	Comprehensive	Comprehensive
	Data Gathering	Limited integration with advanced tools	Limited integration with advanced tools	Robust integration with Salesforce ecosystem
	Agent Skills Management	Basic	Basic	Advanced, with customizable workflows
	Dynamic Workload Management	Basic	Moderate	Advanced, with AI-driven insights
	Real-time Data Validation	Limited	Limited	Extensive, integrated with Einstein AI
	Scalability	High	High	Very High

And, as a cherry on top of a pie, having a ton of integrations often results in what is known as a "spaghetti" architecture, where numerous point-to-point connections create a web of dependencies. This makes it difficult to troubleshoot issues, increasing the overall maintenance efforts [ONEiO].

Rather than relying on patching and fixing standalone tools, it becomes essential to evaluate Platforms that offer fully integrated solutions. Platforms that can handle end-to-end scenarios, manage dynamic workloads effectively, and provide real-time data validation without the need for extensive customizations or integrations.

By focusing on platform-based solutions, we can better ensure that the Customer Support processes are not only comprehensive but also scalable and adaptable to evolving needs. Let's move forward with a comparison of these platforms to see which ones truly meet the demands of modern customer support, available at table 1.

SOLUTION DESIGN

In order to implement all in one solution, a customizable platform needs to be selected. Based on the platforms' comparison result briefly highlighted in table 1, Salesforce CRM turns out to be the one which suits needs the most.

Understanding the platform's features and limitations, especially what is related to Service Cloud, database schema extension shown on figure 2 was designed.

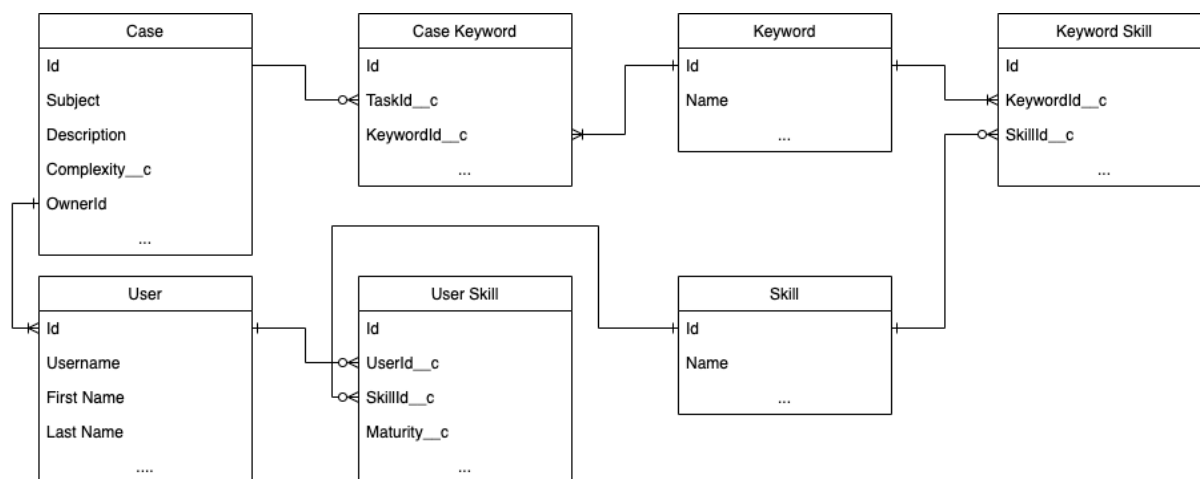


Figure 1 – Complaint escalation request

Above structure may facilitate the automatic and efficient assignment of tasks based on agent skills and task requirements.

From the process perspective, the workflow begins when a Customer reports an issue. The System collects detailed information about the issue from the customer, ensuring that all relevant data is captured accurately. The platform then performs a knowledge search to find potential solutions from the existing knowledge base. If a solution is found, it is suggested to the customer through relevant knowledge articles.

If the initial search does not yield a Solution, the platform saves the issue details and escalates the matter to an AI/ML service for further analysis. The AI/ML service, using a pre-trained model, analyzes the issue details thoroughly. The results of this analysis, including keywords and severity levels, are used to update the issue submission with the necessary skills required to address it.

Next, the updated issue is matched with available agents whose skills align with the identified requirements. The selected agent is notified about the new task assignment. The agent then processes the submission, communicating with the customer to provide updates and work towards resolving the issue.

If the issue is resolved, the agent confirms the resolution and requests feedback from the customer. If the issue is not resolved, the agent continues to assist the customer as needed. The customer is then asked to fill out a feedback form, providing valuable input on the resolution process.

The feedback is analyzed using the pre-trained model to assess customer satisfaction and the speed of resolution. Based on this analysis, the agent's skill level is adjusted accordingly. The supervisor is notified of any changes in agent skills, ensuring continuous improvement and better alignment of agent capabilities with future support requests.

АЛТЕРНАТИВНІ НАУКОВІ ІДЕЇ ТА ГІПОТЕЗИ

This structured workflow not only ensures efficient issue resolution but also continuously improves the system's effectiveness through feedback and AI-driven insights.

Described above transaction in detail is visible on figure 3.

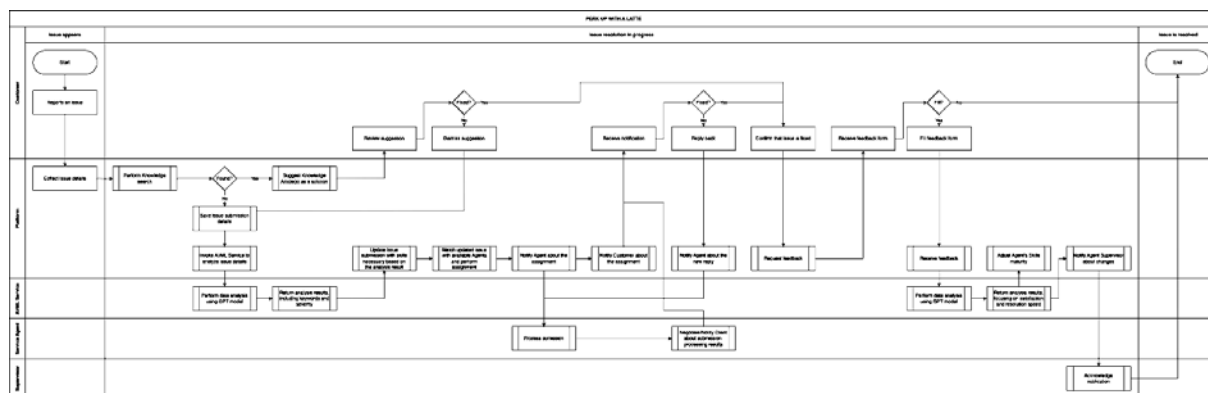


Figure 3 – All-in-one Customer Support Process

Such an approach addresses the problem of unclear task descriptions by using AI to analyze given information, keywords to provide additional context and categorization. It also handles inefficient task assignment by leveraging a detailed mapping of user skills to task requirements, ensuring that tasks are distributed based on agent capabilities using Salesforce CRM capabilities.

SOLUTION IMPACT

To get an understanding of the Solution impact of implementing this comprehensive Customer Support workflow, it's crucial to evaluate both its benefits and drawbacks.

Benefits:

1. Customer-centric approach from start to finish. The Workflow is designed to prioritize the Customer experience, ensuring that their complaints are addressed promptly and effectively, and that their feedback is used to continually refine the Support process.
2. Comprehensive automation across stages. Automating various stages of the Support process reduces the manual workload on Agents, speeds up response times, and ensures consistency in handling issues. This helps to streamline operations and improve overall efficiency.
3. AI/ML integration enhances accuracy. Using AI/ML models like GPT for issues analysis and task allocation ensures that the process is data-driven and precise, which leads to more accurate problem-solving and better resource utilization.
4. Dynamic task allocation improves efficiency. Real-time matching of issues with agents based on their skills ensures that tasks are handled by the most qualified personnel, leading to quicker and more effective resolutions.
5. Continuous improvement through feedback loops. Collecting and analyzing customer feedback allows for ongoing improvements in the system. Adjustments to agent skills and updates to the knowledge base based on feedback ensure the support process remains effective and up-to-date.

Drawbacks:

1. Complexity in implementation and maintenance. Integrating multiple automated processes and AI/ML services can be complex and requires significant technical expertise and resources to maintain.
2. Dependency on AI model accuracy. The effectiveness of the system relies heavily on the accuracy of the AI/ML models used. Poor model performance can lead to incorrect task assignments and unsatisfactory solutions.
3. Resource-intensive (computational power and storage). Running AI/ML services and handling large volumes of data can be resource-intensive, requiring substantial computational power and data storage capabilities unless some pre-built solution is used.
4. Over-reliance on automation may impact customer experience. While automation can improve efficiency, it can also lead to a less personalized customer experience if not balanced with human interaction. Customers may sometimes prefer direct human assistance.

АЛТЕРНАТИВНІ НАУКОВІ ІДЕЇ ТА ГІПОТЕЗИ

5. High initial setup costs. Implementing such a comprehensive system can involve significant initial costs, including purchasing software, integrating AI/ML capabilities, and training staff.

Even though the Solution implementation is currently in progress, we can still refer to some design documentation and publicly-available statistics to share a balanced view, highlighting not only the strengths designed to make the System effective and efficient, but also the challenges that were predicted or have arisen during the implementation [[McKinsey & Company](#), [GreenM](#), [Help Scout](#), [HubSpot](#)].

To better understand the implementation impact on the Customer Support process, a detailed comparison of key metrics was made. Analysis results are available in table #2.

Table 2

METRICS

Stage #1 – Complaint Submission			
Phase		Competitive value	Estimated value
App Research to Find Complaint Submission Form		5-10 minutes	2-5 minutes
Actual Complaint Submission		15 minutes	3-5 minutes
Self-Service		20-30 minutes	15-20 minutes
Stage #2 – Complaint Handling			
Phase	Base value	Competitive value	Estimated value
Complaint Distribution	10-30 minutes	1-2 minutes	2-3 minutes
Complaint Resolution Time	3-5 days	2-3 days	1-2 days
Stage #3 – Feedback Provisioning			
Aspect		Competitive value	Estimated value
Customer Satisfaction Score		65-75%	80-85%

SUMMARY

The study highlights that current implementations often fail to cover end-to-end scenarios comprehensively. Effective use of tools for dynamic workload management and real-time data validation presents significant challenges. Integrated solutions are needed to handle the entire lifecycle of customer support requests - from data gathering to task allocation, and finally, to managing agents' skills based on customer reviews. A holistic approach using AI and machine learning can improve task management in customer support, resulting in better data quality, efficient task distribution, and enhanced agent performance.

The paper identifies several problems in Customer Support, such as inefficient task allocation, poor data quality, and a lack of Self-Service. Vague and incomplete task descriptions due to Customer knowledge gaps and poorly designed Support forms lead to delays and inefficiencies. Automating task allocation using a comprehensive skill matrix and AI-driven systems can address these issues by matching tasks to the most suitable agents and ensuring balanced workloads. Historical data is crucial for training AI systems to make better decisions, resulting in improved task assignment and overall performance.

The suggested solution involves implementing an all-in-one platform, with Salesforce CRM identified as the most suitable option. The proposed workflow begins with detailed data collection, followed by a knowledge search for potential solutions. If no solution is found or they are not helpful, then the reported issue is escalated to an AI/ML service for analysis. The results inform task assignment, matching issues with agents based on their skills. Agents then process tasks, communicate with customers, and request feedback upon resolution. This workflow addresses issues of unclear task descriptions and inefficient task assignment by using

AI for analysis and detailed skill mapping, ensuring continuous improvement through feedback and AI-driven insights.

The benefits of this comprehensive approach include automation across all stages, enhanced accuracy through AI/ML integration, dynamic task allocation, and a customer-centric workflow. However, the implementation is complex, resource-intensive, and heavily reliant on the accuracy of AI models. Despite these challenges, the proposed solution promises to significantly enhance customer support operations, leading to better data quality, efficient task distribution, and improved agent performance.

REFERENCES

1. InsideEVs. Fisker Ocean Owner Concerns. [Online]. Available: <https://insideevs.com/news/714360/fisker-ocean-owner-concerns/>. Created: 2023.
2. Reuters. EV Startup Fisker's Deal Talks with Large Automaker Ends. [Online]. Available: <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/ev-startup-fiskers-deal-talks-with-large-automaker-ends-2024-03-25/>. Created: 2024.
3. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering (IJISAE). Large-Scale Data Gathering: Exploring World Bank's Influence on National Learning. [Online]. Available: <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/3526>. Created: 2023.
4. Dynamic Business. Dealing with a Vague Client: How to Mitigate the Potential Frustration and Come Out on Top. [Online]. Available: <https://dynamicbusiness.com/topics/small-business-resources/dealing-with-a-vague-client-how-to-mitigate-the-potential-frustration-and-come-out-on-top.html>. Created: 2023.
5. UNESCO Learning Portal. Large-Scale Data Gathering: Exploring World Bank's Influence on National Learning. [Online]. Available: <https://learningportal.iiep.unesco.org/es/biblioteca/large-scale-data-gathering-exploring-world-banks-influence-on-national-learning>. Created: 2023.
6. Help Scout. Self-Service: The Definitive Guide. [Online]. Available: <https://www.helpscout.com/helpu/self-service/>. Created: 2023.
7. Connecting Software. Top 5 Software Integration Challenges in 2023 and How to Overcome Them. [Online]. Available: <https://www.connecting-software.com/blog/top-5-software-integration-challenges-in-2023-how-to-overcome-them/>. Created: 2023.
8. Connecting Software. Top 5 Software Integration Challenges in 2023 and How to Overcome Them. [Online]. Available: <https://www.connecting-software.com/blog/top-5-software-integration-challenges-in-2023-how-to-overcome-them/>. Created: 2023.
9. ONEiO. What Are System Integrations? [Online]. Available: <https://www.oneio.cloud/blog/what-are-system-integrations>. Created: 2023.
10. McKinsey & Company. The Next Frontier of Customer Engagement: AI-Enabled Customer Service. [Online]. Available: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/the-next-frontier-of-customer-engagement-ai-enabled-customer-service>. Created: 2023.
11. GreenM. Automating Customer Complaints Management. [Online]. Available: <https://greenm.io/automating-customer-complaints-management/>. Created: 2023.
12. Help Scout. Self-Service: The Definitive Guide. [Online]. Available: <https://www.helpscout.com/helpu/self-service/>. Created: 2023.
13. HubSpot Blog. Pros and Cons of AI in Customer Service. [Online]. Available: <https://blog.hubspot.com/service/pros-cons-ai-in-service>. Created: 2023.

Надійшла до редакції 25.03.2025 р.

SLOBODIAN ROMAN – postgraduated student of Automation and Intelligent Information Technologies Department, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, **e-mail: romich.prof@gmail.com**

BOGACH ILONA — Ph.D., associate professor of the Automation and Intelligent Information Technologies department, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, **e-mail: ilona.bogach@gmail.com**.

Р.В. СЛОБОДЯН, І.В. БОГАЧ
ПРОБЛЕМИ ПРОЦЕСУ ПІДТРИМКИ КЛІЄНТІВ ТА ЇХ КОМПЛЕКСНЕ ВИРІШЕННЯ
Вінницький національний технічний університет

ДО ВІДОМА АВТОРІВ

Вимоги до тематики і структури статей

Тематика

Журнал публікує статті, які містять нові теоретичні та практичні результати в галузях технічних, природничих та гуманітарних наук. Публікуються також огляди сучасного стану розробки важливих наукових проблем, огляди наукових та методичних конференцій, матеріали з педагогіки вищої освіти.

В журналі є такі розділи:

- Принципові концепції та структурування різних рівнів освіти з оптико-електронних інформаційно-енергетичних технологій;
- Методи та системи оптико-електронної і цифрової обробки зображень та сигналів.
- Системи технічного зору і штучного інтелекту з обробкою та розпізнаванням зображень;
- Оптична і квантова електроніка в комп'ютерних та інтелектуальних технологіях;
- Біомедичні оптико-електронні системи та прилади;
- Оптико-електронні пристрої та компоненти в лазерних і енергетичних технологіях;
- Оптичні та оптико-електронні сенсори і перетворювачі в системах керування та екологічного моніторингу;
- Волоконно-оптичні технології в інформаційних (Internet, Intranet тощо) та енергетичних мережах;
- Системи та пристрої відображення інформації;
- Оптико-електронні енергозберігаючі технології.
- Альтернативні наукові ідеї та гіпотези.

Тематична спрямованість видання відповідає спеціальностям:

- 121 – Інженерія програмного забезпечення;
- 122 – Комп'ютерні науки;
- 123 – Комп'ютерна інженерія;
- 124 – Системний аналіз;
- 126 – Інформаційні системи та технології;
- 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка;
- 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології;
- 152 – Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка;
- 163 – Біомедична інженерія;
- 172 – Телекомунікації та радіотехніка.

Міжнародні, закордонні і національні реферативні та наукометричні бази даних, в які включено журнал, і дата включення

- Google Scholar з 2006 року
- Ukrainian Scientific Citation Index (UInCit) з 2019 року
- EBSCOhost з 2023 року
- Information Science & Technology Abstracts з 2023 року
- Nursing/AcademicEdition з 2023 року
- Academic Search Premier; Library з 2023 року
- HealthSource - Consumer Edition з 2023 року
- Regional Business News з 2023 року
- MEDLINE з 2023 року
- «Наукова періодика України» в Національній бібліотеці України ім. В.І. Вернадського з 2008 року

Структура статті

1. Стаття має починатись із короткої (до 4 рядків) **анотації** українською, російською та англійською мовами, яка має містити стисло і точно сформульовану постановку задачі та основні результати. Далі вказується **перелік** (до 10) **ключових слів** (або словосполучень) статті;
2. Далі необхідно подати **вступ**, написаний у формі, доступній для розуміння широкого кола

спеціалістів даної галузі науки. У вступі наводяться:

- постановка питання, що розглядається в статті;
- короткі відомості про історію цього питання;
- пояснення щодо того, де і коли це питання виникає в процесі розв'язання певної задачі.

3. В **основному тексті** статті викладаються і ґрунтовно роз'яснюються отримані твердження і результати. Необхідні для глибшого розуміння змісту статті матеріали (математичні доведення та перетворення, результати експериментальних досліджень, що підтверджують теоретичні положення тощо) виносяться в додаток.

Не слід перевантажувати статтю надмірною кількістю формул, дублюванням одних й тих самих результатів у формулах, таблицях та графіках. Бажано уникати довгих назв таблиць, застосовувати використані в рукописі позначення та скорочення. Вживані в статті позначення і маловідомі терміни необхідно пояснити.

4. Заключна частина має містити приклад (якщо це можливо), який ілюструє ефективність отриманих результатів, та висновки, що відображають нові відомості, отримані автором (авторами), та рекомендації щодо їх практичного застосування. **Висновки та рекомендації** повинні в повній мірі відповідати змісту основного тексту.

Статтю можна розбивати на розділи з назвами та відповідною нумерацією, які відображають їх зміст. Вступ та висновки не нумеруються.

Обсяг статті (у відповідності до вимог журнального варіанту оформлення статей):

- оглядово-узагальнюючого характеру – до 16 сторінок формату А4;
- проблемного характеру – до 11 сторінок формату А4;
- про розв'язання конкретної наукової задачі – до 7 сторінок формату А4;
- у вигляді короткого повідомлення про досягнутий результат – до 3 сторінок формату А4.

Рукописи статей, що перевищують зазначені обсяги редакцією до розгляду не приймаються, за винятком тих, що узгоджені та схвалені колективним рішенням редакційної колегії журналу.

5. В кінці статті наводиться коротка **довідка про авторів**, де вказуються прізвище та ініціали авторів, вчена ступінь, наукове звання, посада, назва підрозділу (кафедри) та організації, її місцезнаходження (місто, країна).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕННЯ ТА ПОДАННЯ СТАТЕЙ

Для публікації статті автори мають підготувати два екземпляри статті: перший – у редакторському варіанті – для рецензування та редакторської роботи, а другий – в журнальному варіанті для прискорення підготовки до друку.

В редакцію необхідно подати:

- якісно роздруковані обидва варіанти оформленої статті (по одному примірнику – редакторський та журнальний варіанти);
- файл журнального варіанту статті (на компакт-диску, flash-накопичувачі або по e-mail);
- супровідні документи (рецензія, акт експертизи, розширені реферати 3-ма мовами, авт. довідка).

Кожний рукопис має бути ретельно перевірений і підписаний всіма авторами. Подальші виправлення та доповнення не допускаються.

Вимоги до оформлення рукопису статті:

Журнальний варіант оформлення статті:

Стаття повинна бути підготована українською, російською або англійською мовою.

1. Для підготовки статті застосовувати текстовий редактор MS WORD for WINDOWS, використавши шрифт Times New Roman (Сур), 10 пт. Стаття повинна бути надрукована на одній стороні аркушів формату А4 (поля: зліва і справа – 2,5 см, зверху – 3 см, знизу – 2,5 см) з інтервалом між рядками – мінімум (min) для 12 пт. Всі сторінки статті мають бути пронумеровані – олівцем на звороті кожної сторінки по центру вказується порядковий номер сторінки та прізвища авторів.

2. У верхньому лівому кутку статті потрібно вказати індекс **УДК** або відповідний індекс міжнародного кодування (10 пт, великими літерами, вирівняти по лівому краю). Пропустивши один рядок друкується **прізвище та ініціали авторів** (10 пт, великими, напівжирними літерами, вирівняти по лівому краю). Пропустивши один рядок – **назва статті** – 14 пт, великими напівжирними літерами, вирівняти по лівому краю. Пропустивши один рядок – **назва організації**, з нового рядка – її

місцезнаходження (адреса, місто, країна), та по можливості, **контактні координати** (телефони, факс, e-mail, WWW – site) організації або особисті контактні координати кожного з авторів (10 пт, курсивними, напівжирними літерами, вирівняти по лівому краю). Далі, пропустивши один рядок, подаються **анотації** (на українській, англійській мовах) та, з нового рядка, перелік **ключових слів** (8 пт, вирівняти по правому краю). Далі пропустивши один рядок слідує **основний текст статті** (10 пт, вирівнювання – по всій ширині сторінки).

3. У статті мають застосовуватись одиниці Міжнародної системи (СІ).

4. **Формули** та позначення набираються у внутрішньому редакторі формул MS WORD. Кожна формула набирається як один об'єкт: full: Times New Roman 12 pt.

Потрібно дотримуватися відмінності в написанні великих та малих літер, особливо таких, як С і с, К і к, Р і р, U і u, V і v, W і w. Дробові числа слід писати через кому, наприклад: 3,14159265.

5. Варіанти подачі **ілюстрацій**:

- включеними (без OLE–зв'язку) у текст статті, після першого посилання на нього.

Примітка: Використовувати для створення ілюстрацій включений в MS WORD for WINDOWS графічний редактор не допускається; або

- у вигляді файлів в форматі TIFF, JPG, GIF кожна окремим файлом та роздруковані у 2-х примірниках; **або**

- у вигляді рисунків, виконаних чорною тушшю або пастою за допомогою креслярського приладдя в двох примірниках, кожна на окремому аркуші формату А4; **або**

- фотографіями (2 примірника), що мають бути якісними, чіткими і контрастними. На зворотному боці кожної ілюстрації (фотографії) простим олівцем вказуються її порядковий номер та прізвище авторів.

Якщо ілюстрації не включені в текст, то підписи до них повинні бути надруковані на одному окремому аркуші формату А4.

6. Кожна **таблиця** повинна бути надрукована з відповідним заголовком та нумерацією, якщо їх більше ніж одна.

Ілюстрації та таблиці в залежності від розміру розміщувати у рамках або по всій ширині сторінки.

7. Перелік **літературних джерел** оформлюється згідно стандарту міжнародного видання «Elsevier» і подається загальним списком у кінці статті. Список складається за чергою посилань у тексті (а не за абеткою).

У тексті статті посилання на літературу ставляться в квадратні дужки (наприклад, [1,2]). Посилання на ще не опубліковані праці не допускаються.

Приклади бібліографічних посилань можна знайти за посиланням: https://www.elsevier.com/__data/promis_misc/apmrformat.pdf

8. Після переліку літературних джерел, пропустивши один рядок, вказується коротка довідка про авторів, де вказуються окремо для кожного з авторів: прізвище та ініціали, вчена ступінь, наукове звання, посада, назва підрозділу (кафедри) та організації, місто, країна.

Редакторський варіант оформлення статті:

Оформлюється з дотриманням таких вимог:

- Поля: зверху – 3 см, решта – 2,5 см, шрифт Times New Roman (Суг), через півтора інтервали між рядками;
- Індекс УДК або відповідний індекс міжнародного кодування – великі літери, 14 пт, вирівняти по лівому краю;
- Прізвище та ініціали авторів – великі літери, 14 пт, вирівняти по лівому краю;
- Назва статті – великі літери, 14 пт, вирівняти по лівому краю;
- назва організації, її координати для кожного з авторів – 14 пт, курсивними, напівжирними літерами, вирівняти по лівому краю;
- Анотації та перелік ключових слів – 10 пт, вирівняти по правому краю;
- Основний текст – 14 пт, вирівнювання – по всій ширині сторінки;
- Формули: full – Times New Roman 14 pt.

В редакторському варіанті статті виконують розмітку формул та позначень за такими правилами: великі літери підкреслюються простим олівцем двома рисками знизу (S),

малі – зверху (S), символи кирилиці (укр., рос.) – підкреслені так само, але використовуючи синій колір. Векторні величини позначаються прямою дужкою знизу (C). Індеси та показники степеня

повинні бути вписані чітко нижче і вище тих символів, яких вони стосуються; індекси позначаються дужкою $\cap$, показники степені – дужкою $\cup$. Літери грецького алфавіту повинні бути обведені червоним.

Формули, на які є посилання в тексті, позначають праворуч від формули порядковими номерами в круглих дужках.

Приклад розмітки формул: $\bar{h}(\bar{t}) = \frac{P_0}{\pi} + \frac{A_m}{\pi} \sin(\omega \bar{t} + \psi) + \bar{h}^{\cap k}$.

Примітка: в разі якісного роздрукування статті розмітку формул робити не обов’язково.

- Ілюстрації та таблиці, в залежності від розміру, розмішувати у рамках або по всій ширині сторінки. Решта вимог такі ж, як і до журнального варіанту оформлення.

Супровідні документи:

Разом із роздрукованими двома екземплярами статті подаються:

- Внутрішня рецензія (підписується доктором технічних наук – фахівцем в даній галузі досліджень) на статтю організації, від якої подається дана стаття;
- Розширений реферат, що містить стисло і точно сформульовану постановку задачі та основні результати. Реферат подається обов’язково трьома мовами – українською, російською та англійською (надрукованих на одному аркуші) у двох примірниках. Реферат слід починати з індексу УДК або відповідного індексу міжнародного кодування, назви статті, далі – текст реферату. Обсяг реферату – 0.5-1 сторінки кожною мовою.

Обов’язковим є подання тексту рефератів (окремими файлами) на оптичних носіях (CD/DVD).

- Авторська довідка (два примірники) від колективу авторів статті, де повинно бути зазначено, що матеріали статті є оригінальними і можуть бути опубліковані у відкритому друці.
- Рекомендацію до опублікування матеріалів від організації, де проводились дослідження.
- Довідка про авторів (прізвище, ім’я, по батькові (повністю), науковий ступінь, вчене звання, посаду та повну назву установи, де виконувались дослідження, номери телефонів та e-mail для зв’язку) та фото кожного з авторів (в чорно-білому варіанті, у форматі JPG). Також дана інформація про авторів подається в кінці самих матеріалів статті.

До відома авторів:

- Якщо стаття оформлена з порушенням зазначених вище вимог та правил, то редакція журналу після попереднього розгляду може відмовити автору в публікації.
- Всі статті публікуються за наявності позитивної зовнішньої рецензії. На зовнішнє рецензування статті направляються редколегією журналу.
- Зміст статті та якість перекладу (українською, російською або англійською мовами) переглядаються редакторами-коректорами журналу, проте повну відповідальність за зміст статті та якість перекладу несуть автори статті.
- До статті можуть бути внесені зміни редакційного характеру без згоди автора.
- Гонорар авторам не виплачується.
- Остаточний висновок щодо публікації схвалює редакційна колегія журналу.

Рукописи статей надсилати:

- на поштову адресу редакції:

Україна, 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе 95, ВНТУ, Кафедра БМІОЕС

із позначкою: Міжнародний науково-технічний журнал “Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології”, або

- на адресу e-mail: oeipts@gmail.com, psv@vntu.edu.ua

із позначкою: Міжнародний науково-технічний журнал “Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології”.

Консультації з приводу оформлення статей можна отримати в редакції міжнародного науково-технічного журналу “Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології”, Вінницький національний технічний університет, кафедра лазерної та оптоелектронної техніки, к. 2243А або за тел.: +38 (0432) 59-81-25, +38 (097) 239-43-06 або по e-mail: oeipts@gmail.com, psv@vntu.edu.ua

INFORMATION FOR CONTRIBUTORS

Requirement regarding the structure and subjects of publications

Subjects of publications

The journal is intended for publication containing new theoretical and practical results in the area of engineering and natural science, as well as publications devoted problems dealing with teaching of engineering sciences.

The journals publishes the articles in the area of:

- Principal concepts and structural approaches to the three-level system of specialist training: "Bachelor-Engineer-Master" in the specialization of "Optoelectronic Information-Energy Technologies";
- Optoelectronic/Digital Methods and Systems for Image/Signal Processing;
- Systems of Technical Vision and Artificial Intelligence, Image Processing and Pattern Recognition;
- Optical and Quantum Electronics in Computer and Intelligent Technologies;
- Biomedical Optoelectronic Systems and Apparatus;
- Optoelectronic Devices and Components in Laser and Energy Technologies;
- Optical and Optoelectronic Sensors and Transformers for Systems of Control and Ecology Monitoring;
- Fiber-Optical Technologies for Information (Internet, Intranet etc.) and Energy Networks;
- Systems and Devices for Information Representation;
- Optoelectronic Technologies for Energy Saving;
- Alternative scientific ideas and hypotheses.

The structure of the article:

1. The article should contain short abstract (up to 200 words) presented in English. The abstract must contain briefly formulated problem and main results. Keywords: their amount must not exceed 10 words.
2. Introduction, written in the form comprehensible for the readership of this given branch of science.
The introduction contains:
 - The problem being discussed in the article;
 - Historic outlook of the problem;
 - Explanations regarding when and where this problem arises in the process given problem solution.
3. The article considers and explains the results obtained materials needed for deeper understanding of the article (mathematical transformations, results of experiments, proving theoretical argumentation) are supplied in the appendix. It is not recommended to overweight the article with numerous formulas presenting the same results in formulas, tables, graphs. It is advisable to avoid long titles of the tables, use notations and abbreviations already applied in the manuscript. Specific notation and terms must be explained.
4. The conclusion of the article must contain the example (if it is possible) that illustrates the efficiency of the results obtained and conclusion reflecting new information, obtained by the author (authors) and recommendations recording their practical application. Conclusions and recommendations should correspond the content of publication. The article can be divided into chapters. The title of the chapter should correspond to its content.

Volume of the publications:

- The article of general character – up to 16 pages (A4 format);
 - The article of problematic character – up to 11 pages (A4 format);
 - The article regarding specific scientific problem – up to 7 pages (A4 format);
 - The short communications – up to 3 pages (A4 format).
5. Brief information about the authors is placed at the end of the article. The following information is indicated last name, initials, scientific degree, name of affiliated institution (address, city, country) and contact information of each authors (address, city, country, phone/fax, e-mail).

EDITORIAL BOARD ADDRESS: 95, Khmelnytske shose, Vinnytsya, 21021, Ukraine
Vinnytsya National Technical University, Editorial Board of International Scientific Journal
"Optoelectronic information–power technologies"

Tel. +38 (0432) 59-81-25

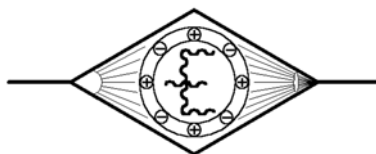
Fax: +38 (0432) 46-57-72

E-mail: oeipts@gmail.com

<http://oeipt.vntu.edu.ua/>

Vinnitsia National Technical University

Ministry of Education and Science of Ukraine
Academy of Engineering Science of Ukraine
V. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics of NASU
Uzhgorod National University
Georgia Technical University
Lublin Technical University
The International Societies for Optical Engineering – SPIE, OSA



Optoelectronic Information- Power Technologies

№ 1 (49), 2025

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL

Published since 2001

The biannual publication

Certificate of registration - KV No. 15295-3867P dated June 22, 2009.

Media identifier – R30-01502 (Decision of the National Council of Ukraine on Television and Radio Broadcasting, No. 1234 dated October 31, 2023)

(re-registration, Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 820 dated July 11, 2016)

Category B in the field of Technical Sciences, Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine № 409 dated March 17, 2020

Recommended for publication by the decision of Science Counsel of VNTU, Protocol for № 12 of 29.05.2025

EDITORIAL BOARD ADDRESS:

Ukraine, 21021, Vinnitsia,
95, Khmel'nitske Shosse

Tel.: +38 (0432) 51-32-56

Fax: +38 (0432) 46-57-72

<https://oeipt.vntu.edu.ua/>

E-mail: oeipts@gmail.com

INTERNATIONAL SCIENTIFIC JOURNAL

“OPTOELECTRONIC INFORMATION-POWER TECHNOLOGIES”

EDITORIAL BOARDS

EDITOR-IN-CHIEF:

Pavlov S. V. Vinnytsia National Technical University, Ukraine

DEPUTY EDITORIAL-IN-CHIEF:

Wojcik W. T. Technological University "Lublin Politechnika", Poland

Osadchuk V. S. Vinnytsia National Technical University, Ukraine

Ushenko O. G. Chernivtsi National University named after. Y. Fedkovich, Ukraine

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Azarov O. D.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Angelskii O. V.
Chernivtsi National University named after. Y. Fedkovich, Ukraine
Avrunin O. G.
Kharkiv National University of Radioelectronics, Ukraine
Bobitskii Y. V.
National University "Lvivska Polytechnika", Ukraine
Bisikalo O. V.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Bun R. A.
National University "Lvivska Polytechnika", Ukraine
Grabko V. V.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Kvyetnyy R. N.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Kolitsnyk P. F.
Vinnitsa National Medical University named after. M I Pirogov
Kovalenko V. S.
Research Institute of Laser Engineering and Technology National
Technical University of Ukraine "KPI", Ukraine
Kychak V. M.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Kryvonosov V. E.
National Aviation University, Kyiv, Ukraine
Kukharchuk V. V.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Kulakov P. I.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Lepikh Y. I.
Odessa National University named after. Mechnikov Ukraine
Luzhetsky V. A.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Lezhniuk P. D.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Lytvynenko V. I.
Kherson State University, Ukraine
Mamyrbayev O. Zh.
Institute of Information and Computational Technologies CS of MSE,
Almaty, Republic of Kazakhstan
Martunyk T. B.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Medikovskiy N. O.
National University "Lvivska Polytechnika", Ukraine
Muravsky L. I.
Physics and Mechanics Institute GV Karpenko of the National Academy of
Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine
Nykyforova L. E.
National University of Life and Environmental Sciences of Ukraine,
Kyiv
Nikolaichuk Y. M.
Ternopil National Economic University, Ukraine

Osadchuk O. V.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Omiotek Z. B.
Technological University "Lublin Politechnika", Poland
Petruk V. G.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Povoroznyuk A. I.
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Romanyuk O. N.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Rotshtein A. P.
Donetsk National University named after. Vasyl Stus
Rusyn B. P.
Physics and Mechanics Institute G V Karpenko of the National Academy
of Sciences of Ukraine, Lviv, Ukraine
Saldan Y. R.
Vinnitsa National Medical University named after. M I Pirogov
Shaiko-Shaikovsky O. G.
Chernivtsi National University named after. Y. Fedkovich, Ukraine
Shevchuk V. I.
Ukrainian State Research Institute of Medical and Social
Problems of Disability, Vinnytsia, Ukraine
Smailova S. S.
D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University,
Oskemen, Republic of Kazakhstan
Smolarz Andrzej
Technological University "Lublin Politechnika", Poland
Sorokin V. M.
Institute of Semiconductor Physics named after. V. E. Lashkarev
National Academy of Sciences, Ukraine
Tymchyk G. S.
National Technical University of Ukraine "KPI", Ukraine
Timchenko L. I.
National Transport University, Kyiv, Ukraine
Titova N. V.
Odessa Polytechnic National University, Ukraine
Tuzhanskyi S. E.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Vasilenko V. B.
New University of Lisbon, Lisbon, Portugal
Vasilevskiy O. M.
University of Texas at Austin, USA
Vlasenko O. V.
Vinnitsa National Medical University named after. M I Pirogov
Volodarsky E. T.
National Technical University of Ukraine "KPI", Ukraine
Yarovyi A. A.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Zabolotna N. I.
Vinnytsia National Technical University, Ukraine

EXECUTIVE SECRETARIES:

Kozhemiako A. V. Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Tuzhanskyi S. E. Vinnytsia National Technical University, Ukraine
Kostyukevych S. O. Institute of Semiconductor Physics of NASU, Kyiv, Ukraine

TECHNICAL SECRETARIES:

Pavlov V. S., Karas O. V.

EDITORS CORRECTORS:

Pradivlyanii M. G., Veremienko S. Y.

МІЖНАРОДНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології

№1(49), 2025

**Свідоцтво про реєстрацію – КВ № 15295–3867Р від 22.06.2009 р.
Ідентифікатор медіа – R30-01502 (Рішення Національної ради України з питань
телебачення та радіомовлення, № 1234 від 31.10.2023 року)**

Рекомендовано до друку рішенням Вченої ради ВНТУ, протокол № 12 від 29.05.2025 р.

Редактори-коректори: Веремієнко С. Я., Прадівляний М. Г.
Технічні редактори: Павлов В. С., Карась О. В.

Підписано до друку 17.06.2025 року. Формат 29,7 × 42 ½ . Гарнітура Times New Roman.
Папір офсетний. Умовн. друк. арк. 31,23.
Наклад 50 прим. Зам № 2025-026

Видавець та виготовлювач -
Вінницький національний технічний університет,
редакційно-видавничий відділ.
Україна, 21021, м. Вінниця, Хмельницьке шосе, 95, ВНТУ, ГНК, кімната 114
<https://press.vntu.edu.ua>
email: rvv.vntu@gmail.com

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ:
Україна, 21021, м. Вінниця,
вул. Хмельницьке шосе, 95.

Тел.: +38 (0432) 59-81-25
Факс: +38 (0432) 46-57-72
<https://oeipt.vntu.edu.ua/>
E-mail: oeipts@gmail.com
