

ISSN 2786-5460 (Print)
ISSN 2786-5479 (Online)

МІЖРЕГІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ УПРАВЛІННЯ ПЕРСОНАЛОМ
INTERREGIONAL ACADEMY OF PERSONNEL MANAGEMENT



**НАУКОВІ ПРАЦІ
МІЖРЕГІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ
УПРАВЛІННЯ ПЕРСОНАЛОМ**

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА СУСПІЛЬСТВО**

**SCIENTIFIC WORKS
OF INTERREGIONAL ACADEMY
OF PERSONNEL MANAGEMENT**

**INFORMATION TECHNOLOGY
AND SOCIETY**

**Випуск 3 (14), 2024
Issue 3 (14), 2024**



**Видавничий дім
«Гельветика»
2024**

*Рекомендовано до друку Вченою радою
Міжрегіональної Академії управління персоналом
(протокол № 11 від 30 жовтня 2024 року)*

Інформаційні технології та суспільство / [головний редактор О. Попов]. – Київ : Міжрегіональна Академія управління персоналом, 2024. – Випуск 3 (14). – 54 с.

Журнал «Інформаційні технології та суспільство» є науковим рецензованим виданням, в якому здійснюється публікація матеріалів науковців різних рівнів у вигляді наукових статей з метою їх поширення як серед вітчизняних дослідників, так і за кордоном.

Редакційна колегія не обов'язково поділяє позицію, висловлену авторами у статтях, та не несе відповідальності за достовірність наведених даних і посилань.

Головний редактор: Попов О. О. – член-кор. НАН України, д-р техн. наук, професор, в.о. директора Центру інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України.

Редакційна колегія:

Василенко М. Д. – д-р фіз.-мат. наук, проф., професор кафедри кібербезпеки, Національний університет «Одеська юридична академія»; **Горбов І. В.** – канд. техн. наук, с.н.с., старший науковий співробітник, Інститут проблем реєстрації інформації НАН України; **Дуднік А. С.** – д-р техн. наук, доц., доцент кафедри мережевих та інтернет технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; **Євсєєв С. П.** – д-р техн. наук, професор кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця; **Зибін С. В.** – д-р техн. наук, доц., завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення, Національний авіаційний університет; **Кавун С. В.** – д-р екон. наук, канд. техн. наук, проф., завідувач кафедри комп'ютерних інформаційних систем та технологій, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Комарова Л. О.** – д-р техн. наук, с.н.с., директор Навчально-наукового інституту інформаційної безпеки та стратегічних комунікацій, Національна академія Служби безпеки України; **Мілов О. В.** – д-р техн. наук, професор кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця; **Охріменко Т. О.** – канд. техн. наук, старший науковий співробітник науково-дослідної лабораторії протидії кіберзагрозам в авіаційній галузі, Національний авіаційний університет; **Рудніченко М. Д.** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри інформаційних технологій, Державний університет «Одеська політехніка»; **Скुरатовський Р. В.** – канд. фіз.-мат. наук, доц., доцент кафедри обчислювальної математики та комп'ютерного моделювання, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Супрун О. М.** – канд. фіз.-мат. наук, доц., доцент кафедри програмних систем і технологій, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; **Табунщик Г. В.** – канд. техн. наук, проф., професор кафедри програмних засобів, Національний університет «Запорізька політехніка»; **Фомін О. О.** – д-р техн. наук, доц., професор кафедри комп'ютеризованих систем управління, професор кафедри прикладної математики та інформаційних технологій, Державний університет «Одеська політехніка»; **Хохлячова Ю. Є.** – канд. техн. наук, доц., доцент кафедри безпеки інформаційних технологій, Національний авіаційний університет; **Чолишкіна О. Г.** – канд. техн. наук, доц., директор Інституту комп'ютерно-інформаційних технологій та дизайну, Міжрегіональна Академія управління персоналом; **Чорний О. П.** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту електричної інженерії та інформаційних технологій, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського; **Юдін О. К.** – д-р техн. наук, проф., директор центру кібербезпеки Навчально-наукового інституту інформаційної безпеки та стратегічних комунікацій, Національна академія Служби безпеки України; **Гопєєнко Віктор** – dr. sc. ing., проф., проректор з наукової роботи, директор навчальної програми магістратури «Комп'ютерні системи», Університет прикладних наук ISMA (Латвійська Республіка); **Leszczyna Rafal** – dr hab. inż., професор кафедри комп'ютерних наук у менеджменті, Гданський технологічний університет (Республіка Польща).

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа:

Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення № 1173 від 11.04.2024 року.

Відповідно до Наказу МОН України № 1290 від 30 листопада 2021 року (додаток 3) журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія Б) зі спеціальностей 121 – Інженерія програмного забезпечення, 122 – Комп'ютерні науки, 123 – Комп'ютерна інженерія, 124 – Системний аналіз, 125 – Кібербезпека, 126 – Інформаційні системи та технології.

Усі електронні версії статей журналу оприлюднюються на офіційній сторінці видання
<http://journals.maup.com.ua/index.php/it>

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

*Recommended for publication
by Interregional Academy of Personnel Management
(Minutes No. 11 dated 30 October 2024)*

Information Technology and Society / [chief editor Oleksandr Popov]. – Kyiv : Interregional Academy of Personnel Management, 2024. – Issue 3 (14). – 54 p.

Journal «Information Technology and Society» is a peer-reviewed scientific edition, which publishes materials of scientists of various levels in the form of scientific articles for the purpose of their dissemination both among domestic researchers and abroad.

Editorial board do not necessarily reflect the position expressed by the authors of articles, and are not responsible for the accuracy of the data and references.

Chief editor: Oleksandr Popov – Corresponding Member of NAS of Ukraine, Doctor of Engineering, Professor, Acting Director of the Center for Information-Analytical and Technical Support of Nuclear Power Facilities Monitoring of the National Academy of Sciences of Ukraine.

Editorial Board:

Mykola Vasylenko – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Professor at the Department of Cybersecurity, National University «Odesa Law Academy»; **Ivan Horbov** – PhD in Engineering, Senior Research Associate, Senior Research Fellow, Institute for Information Recording of NAS of Ukraine; **Andrii Dudnik** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Networking and Internet Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Serhii Yevseiev** – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Cybersecurity and Information Technologies, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics; **Serhii Zybin** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Head of the Department of Software Engineering, National Aviation University; **Serhii Kavun** – Doctor of Economics, PhD in Engineering, Professor, Head of the Department of Computer Information Systems and Technologies Interregional Academy of Personnel Management; **Larysa Komarova** – Doctor of Engineering, Senior Research Scientist, Laureate of State Prize, Director of Educational-Scientific Institute of Information Security and Strategic Communications, National Academy of the Security Service of Ukraine; **Oleksandr Milov** – Doctor of Engineering, Professor at the Department of Cybersecurity and Information Technologies, Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics; **Tetiana Okhrimenko** – PhD in Engineering, Senior Research Scientist at the Scientific Research Laboratory for Countering Aviation Cyberthreats, National Aviation University; **Mykola Rudnichenko** – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Information Technologies, Odessa Polytechnic State University; **Ruslan Skuratovskiy** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Computational Mathematics and Computer Modeling, Interregional Academy of Personnel Management; **Olha Suprun** – PhD in Physics and Mathematics, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Software Systems and Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv; **Halyna Tabunshchik** – PhD in Engineering, Professor, Professor at the Department of Software Tools, “Zaporizhzhia Polytechnic” National university; **Oleksandr Fomin** – Doctor of Engineering, Associate Professor, Professor at the Department of Computerized Control Systems, Professor at the Department of Applied Mathematics and Information Technologies, Odessa Polytechnic State University; **Yuliia Khokhlachova** – PhD in Engineering, Associate Professor, Senior Lecturer at the Department of Information Technology Security, National Aviation University; **Olha Cholyshkina** – PhD in Engineering, Associate Professor, Director of the Institute of Computer Information Technologies and Design, Interregional Academy of Personnel Management; **Oleksii Chorny** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Institute of Electrical Engineering and Information Technologies, Kremenchuk National University named after Mykhailo Ostrogradskiy; **Oleksandr Yudin** – Doctor of Engineering, Professor, Director of the Cybersecurity Center of the Educational-Scientific Institute of Information Security and Strategic Communications, National Academy of the Security Service of Ukraine; **Hopeienko Viktor** – dr. sc. ing., Professor, Vice Rector for Research, Director of the study programme “Computer systems”, ISMA University of Applied Sciences (Republic of Latvia); **Leszczyna Rafal** – dr hab. inż., Profesor, Katedra Informatyki w Zarządzaniu, Politechnika Gdańska (Republic of Poland).

Registration of Print media entity:

Decision of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine: Decision No. 1173 as of 11.04.2024.

According to the Decree of MES No. 1290 (Annex 3) dated November 30, 2021, the journal was included in the List of scientific professional publications of Ukraine (category B) in specialties 121 – Software engineering, 122 – Computer sciences, 123 – Computer engineering, 124 – Systems analysis, 125 – Cybersecurity, 126 – Information systems and technologies.

All electronic versions of articles in the collection are available on the official website edition
<http://journals.maup.com.ua/index.php/it>

The articles were checked for plagiarism using the software
StrikePlagiarism.com developed by the Polish company Plagiat.pl.

ЗМІСТ

Андрій КИСІЛЬ
КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ ФОТОРЕЄСТРАЦІЇ UAV
У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ6

Володимир КОЗУБ
ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБЕРІГАННЯ У NO-SQL БАЗАХ ДАНИХ.....14

Serhii KOLOMOIETS
APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MEDICAL IMAGE RECOGNITION23

**Олександр ПОПОВ, Андрій ЯЦИШИН, Анастасія ЛАГОЙКО, Володимир КУЦЕНКО,
Олександр КОВАЛЕНКО, Євген КРАСНОВ**
СУЧАСНІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЕФЕКТУ «ЗМИВУ» ПРИ ВИМІРЮВАННІ
КОНЦЕНТРАЦІЙ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА29

Андрій СТЬОПКІН
МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ НЕОРІЄНТОВАНИХ ГРАФІВ38

Іван ШЕВЦОВ
ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ EDGE COMPUTING ТА FOG COMPUTING
У СИСТЕМАХ МЕДИЧНОГО МОНІТОРИНГУ44

CONTENTS

Andrii KYSIL
COMPREHENSIVE METHODOLOGY FOR REAL-TIME PREPROCESSING
OF UAV PHOTOREGISTRATION DATA.....6

Volodymyr KOZUB
TECHNOLOGY FOR IMPROVING STORAGE EFFICIENCY IN NO-SQL DATABASES14

Serhii KOLOMOIETS
APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MEDICAL IMAGE RECOGNITION23

**Oleksandr POPOV, Andrii IATSYSHYN, Anastasiia LAHOIKO, Volodymyr KUTSENKO,
Oleksandr KOVALENKO, Yevhen KRASNOV**
MODERN TECHNICAL SOLUTIONS TO REDUCE THE «DOWN-WASH» EFFECT WHEN MEASURING
POLLUTANT CONCENTRATIONS USING UAVS.....29

Andrii STOPKIN
MULTI-AGENT SYSTEM FOR NON-ORIENTED GRAPHS EXPLORATION.....38

Ivan SHEVTSOV
THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF EDGE COMPUTING AND FOG COMPUTING
IN MEDICAL MONITORING SYSTEMS.....44

УДК 004.9:629.735.33

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.3.1>

Андрій КИСІЛЬ

аспірант кафедри комп'ютерних інформаційних систем і технологій

Інститут комп'ютерно-інформаційних технологій та дизайну

ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія управління персоналом»

ORCID: 0009-0006-5815-5007

КОМПЛЕКСНА МЕТОДИКА ПОПЕРЕДНЬОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ ФОТОРЕЄСТРАЦІЇ UAV У РЕЖИМІ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ

Анотація. У статті проведено аналіз сучасних підходів, що використовуються на етапі попередньої обробки даних фотореєстрації безпілотних літальних пристроїв програмними алгоритмами. Продовжено розробку проблеми ефективної обробки великих масивів поточкових даних систем фотореєстрації безпілотного літального пристрою у режимі реального часу за умов обмеженого обчислювального ресурсу.

Метою роботи є побудова цілісної методики відновлення та попередньої сегментації матриці цифрового зображення програмними методами у відповідності до адитивної колірної схеми системи фотореєстрації без включення у дослідження методів компенсації оптичних аберацій системи фотореєстрації та просторової фільтрації вхідних даних.

Методологія. Використано комплексний підхід до обробки цифрових зображень, що включає етапи попередньої обробки (PRIP), відновлення та кластеризації матриці зображення з адаптацією до обмежень обчислювальних ресурсів апаратно-програмної платформи. Для обробки використовуються порогові та морфологічні методи, які забезпечують попередню сегментацію і фільтрацію шумів, а також класифікацію та виділення зв'язних компонент у зображеннях.

Наукова новизна полягає у тому, що розроблено підхід щодо послідовного застосування процедур ерозії та дилатації для видалення шумів, збереження границь важливих елементів, а також алгоритм для виділення границь зображень через різницю між вихідним зображенням та результатом ерозії у залежності від колірної схеми зображення. Запропоновано триетапний підхід для алгоритму сегментації кольорового зображення, який включає виявлення розривів у границях, порогову обробку та обробку областей. Обмеження кількості сегментів пропонується проводити шляхом введення маркерів.

Висновки. Основна увага була приділена моделюванню та фільтрації шумів, які виникають через типові обмеження системи фотореєстрації та оптичні властивості середовища. Проаналізовано базові процедури попередньої обробки бінарних зображень, такі як дилатація, ерозія та виділення границь, на основі логічних операторів та примітивів корекції. Представлено особливості застосування порогових методів попередньої обробки зображень як простого і ефективного підходу для поділу зображення на області. Розроблено схему для реалізації алгоритму обробки кольорового зображення з глобальним порогом, яка включає етапи початкової оцінки порогу, його корекції та повторної перевірки до досягнення заданої точності. На останньому етапі проаналізовано методи попередньої сегментації зображення методом водоподілу.

Ключові слова: попередня обробка зображення, безпілотні літальні пристрої, статистичний шум, морфологічні методи, зв'язні компоненти зображення, алгоритм з адаптивним порогом, сегментація матриці зображення.

Andrii KYSIL. COMPREHENSIVE METHODOLOGY FOR REAL-TIME PREPROCESSING OF UAV PHOTOREGISTRATION DATA

Abstract. The article analyzes the modern approaches used at the stage of pre-processing of unmanned aerial vehicle photo registration data by software algorithms. The development of the problem of efficient processing of large arrays of streaming data of photo registration systems of unmanned aerial vehicles in real time under conditions of limited computing resources is continued.

The aim of the work is to build a holistic methodology for restoring and pre-segmenting the digital image matrix by software methods in accordance with the additive color scheme of the photo registration system without including methods for compensating for optical aberrations of the photo registration system and spatial filtering of input data.

Methodology. An integrated approach to digital image processing is used, including the stages of pre-processing (PRIP), restoration and clustering of the image matrix with adaptation to the limitations of the computing resources of the hardware and software platform. Thresholding and morphological methods are used for processing, which provide preliminary segmentation and noise filtering, as well as classification and extraction of connected components in images.

The scientific novelty is that an approach to the sequential application of erosion and dilatation procedures to remove noise, preserve the boundaries of important elements, and an algorithm for highlighting image boundaries due to the difference between the original image and the erosion result, depending on the color scheme of the image, has been developed. A three-stage approach for the color image segmentation algorithm is proposed, which includes detection of boundary gaps, thresholding, and region processing. It is proposed to limit the number of segments by introducing markers.

Conclusions. The main attention was paid to the modeling and filtering of noise arising from the typical limitations of the photo registration system and the optical properties of the environment. The basic procedures of binary image preprocessing, such as dilatation, erosion, and edge detection, based on logical operators and correction primitives, were analyzed. The peculiarities of using thresholding methods of image preprocessing as a simple and effective approach for dividing an image into regions are presented. A scheme for implementing a color image processing algorithm with a global threshold is developed,

which includes the stages of initial threshold estimation, correction, and re-checking until the specified accuracy is achieved. At the last stage, the methods of preliminary image segmentation using the watershed method are analyzed.

Key words: image preprocessing, unmanned aerial vehicles, statistical noise, morphological methods, image connected components, adaptive threshold algorithm, image matrix segmentation.

Вступ. Протягом двох останніх десятирічь спостерігається широке впровадження та оптимізація програмних засобів автоматичної обробки графічних даних, зокрема, масивів даних систем фотореєстрації [4; 7; 9; 11; 14; 17]. Важливою складовою машинного аналізу графічних даних є процедура попередньої обробки (Preliminary Image Processing; PRIP), що включає у себе відновлення та кластеризацію матриці зображення [7; 9; 14]. На сьогоднішній день в основі найбільш ефективних алгоритмів PRIP лежить адаптація нейромережевих архітектур і, зокрема, нейромереж глибокого навчання, що характеризуються високою ресурсоємністю [4; 11; 17]. Функціональними параметрами апаратно-програмної платформи системи машинного аналізу графічних даних, що у даному випадку підлягають аналізу, є пропускна здатність мережевих каналів та загальний обчислювальний ресурс центрального процесору (Central Processing Unit; CPU) і сопроцесорів.

Можна зазначити, що при виборі у якості періоду спостереження 1980–2020 рр., пропускна здатність мережевих каналів та обчислювальний ресурс серверних комплексів показують експоненційне зростання (рис. 1).

Показник пропускної здатності згідно даних, що наведені на рис. 1-а, зростав у 10 разів кожні десять років від 56 Кбіт/с аналогових телефонних ліній до 400 Гбіт/с завдяки впровадженню цифрових технологій, ширококутового доступу, оптоволоконних рішень, мобільних мереж 4G LTE та 5G, а також нових підходів у розподілі частот і розвитку магістральних Ethernet-ліній [2; 16]. Показник обчислювальної потужності, натомість зростав у 1000 разів кожні десять років від 1 МФлопс для CPU 1980-х років, до 1 ЕФлопс у 2020-х завдяки впровадженню багатоядерних процесорів, гібридних систем з графічними процесорами та суперкомп'ютерів стандарту Exascale, що широко використовуються в машинному навчанні та штучному інтелекті [3; 10].

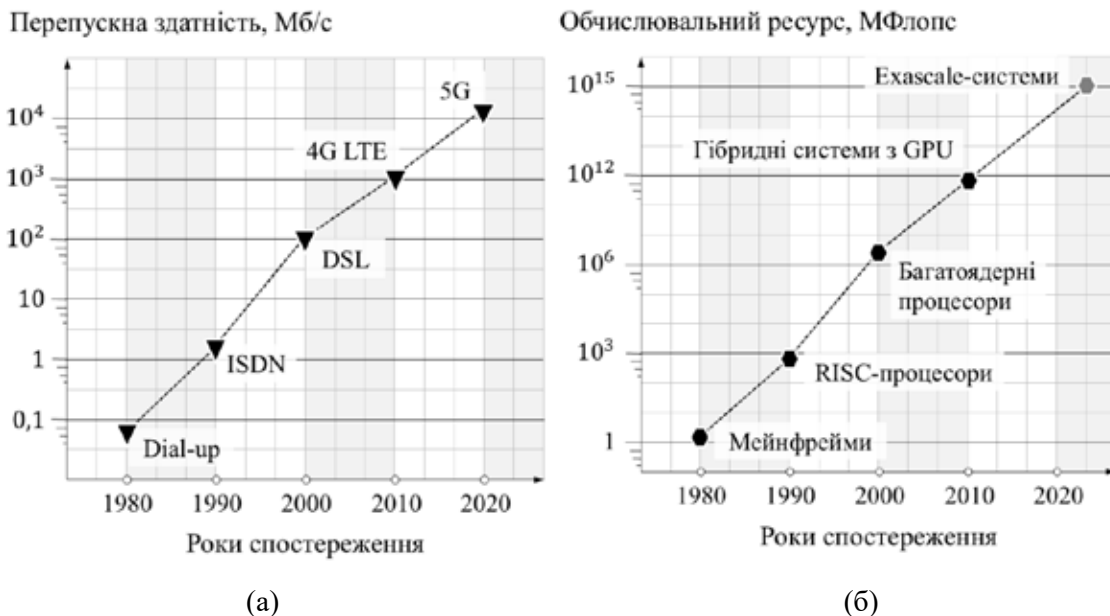


Рис. 1. Діаграма експоненційного росту (а) пропускної здатності та (б) обчислювального ресурсу інформаційних систем

Тим не менш, слід зазначити, що відповідні показники характерні для центрів обробки даних, у той час як обчислювальний ресурс мобільних електронних пристроїв та пропускна здатність у відповідності до стандартів мобільного зв'язку, у багатьох випадках є недостатніми для впровадження сучасних нейромережевих алгоритмів обробки великих масивів даних фотореєстрації. При цьому однією з важливих проблем при застосуванні ресурсоємних алгоритмів PRIP є оснащення апаратно-програмної платформи безпілотних літальних апаратів (Unmanned Aerial Vehicle; UAV). Оскільки відповідні апарати зазвичай працюють у реальних умовах з обмеженими можливостями для передачі великих обсягів

даних, а також мають компактні і енергоефективні процесори, використання складних алгоритмів може суттєво уповільнювати час реакції системи, що є неприпустимим, особливо за умов застосування UAV на лінії зіткнення [1; 13; 19]. Це вказує на високу актуальність розробки програмних методів обробки даних фотореєстрації UAV і їх подальшої оптимізації для зменшення навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи.

Аналіз останніх наукових досліджень присвячених проблемам впровадження засобів автоматизованої обробки даних системи фотореєстрації надає можливість визначити актуальні підходи відновлення цифрового зображення через зменшення рівню шумів [15; 21]. Зазначається, що параметри математичної моделі шуму залежить від особливостей системи фотореєстрації та оптичних властивостей середовища. Сучасні програмні алгоритми зазвичай базуються на комбінації моделей гаусівського та пуассонівського розподілу шуму, але у аналіз також може бути включено розподіл Релея та розподіл Ерланга [15; 21]. Після визначення розподілу шуму до матриці зображення застосовується просторова фільтрація, що є інструментом для видалення адитивної компоненти шуму. Алгоритми просторової фільтрації при цьому можуть базуватись на обчисленні середнього значення [20], порядкових статистиках [5], як то медіанних фільтрах, обчисленні максимального і мінімального значення та виборі середньої точки, а також фільтрах, що базуються на вейвлет-перетворенні [6]. Наступними етапами відновлення матриці зображення є застосування морфологічних методів, що разом з застосуванням зв'язкових компонент і граничних методів може бути використано для попередньої сегментації зображення [8; 12; 18]. При цьому зазначається складність впровадження відповідних алгоритмів для обробки кольорових зображень за умов обмеження обчислювального ресурсу апаратно-програмної платформи [5; 6; 8; 12; 18], що розглядається як невіршена частина загального дослідження.

Метою статті є побудова цілісної методики відновлення та попередньої сегментації матриці цифрового зображення програмними методами у відповідності до адитивної колірної схеми системи фотореєстрації без включення у дослідження методів компенсації оптичних аберацій системи фотореєстрації та просторової фільтрації вхідних даних.

1. Постановка задачі відновлення та попередньої сегментації матриці цифрового зображення

Складові масиву потокових даних системи фотореєстрації, що представляють собою набори цифрових зображень, на математичному рівні формалізуються через введення наборів двовимірних матриць $RGB: \{R(x, y); G(x, y); B(x, y)\}$, кожна з яких являє собою колірний канал у відповідності до колірної схеми RGB. Діапазон, у якому визначається кожен з елементів матриць колірних каналів $R(x, y), G(x, y), B(x, y) \in [0; I]$ відповідає динамічному діапазону матриці, у той час як діапазони $x \in [1; X]$ і $y \in [1; Y]$ відповідають роздільній здатності матриці зображення $X \times Y$ (рис. 2).

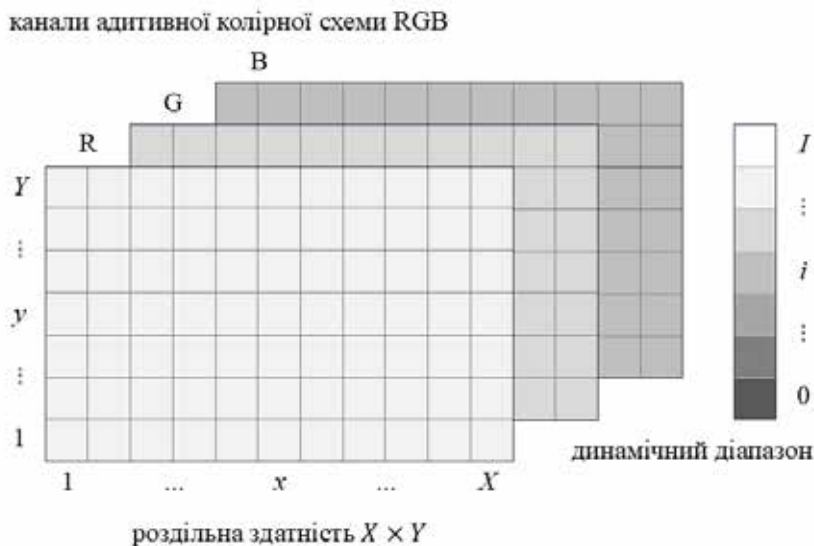


Рис. 2. Математична модель матриці цифрового зображення у відповідності до адитивної колірної схеми RGB

Слід зазначити, що для ряду задач колірна схема може бути розширена через включення додаткового каналу, представленого матрицею $T(x, y)$, який визначає рівень прозорості базового елементу

(пікселя) матриці цифрового зображення, що в загальному випадку характеризується власним динамічним діапазоном $T(x, y) \in [0; I_T]$. Також у рамках моделі може бути обрана інша адитивна колірна схема, у відповідності до задачі дослідження.

У рамках дослідження пропонується побудувати комплексну методику відновлення та попередньої сегментації матриці цифрового зображення програмними методами з адаптацією до адитивної колірної схеми системи фотореєстрації, що включає у себе наступні етапи (рис. 3):

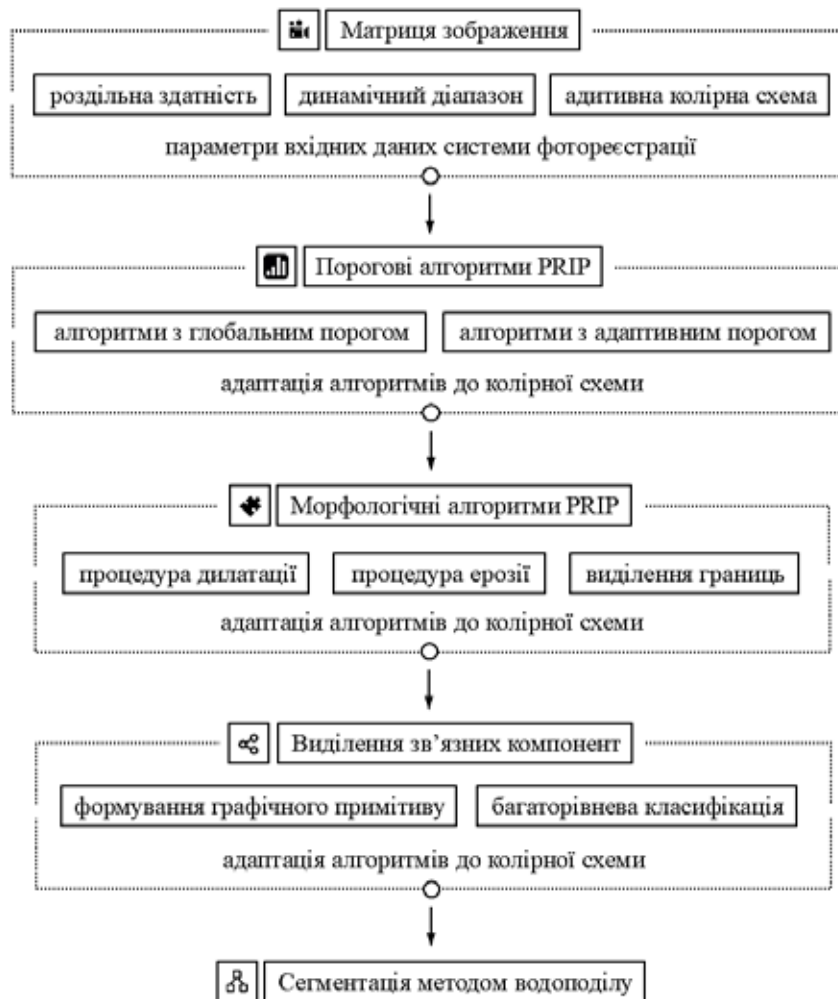


Рис. 3. Базова схема відновлення та попередньої сегментації матриці цифрового зображення

1. Визначення формату представлення вхідних даних, як то роздільна здатність, динамічний діапазон та адитивна колірна схема матриці зображення

2. Застосування порогових методів PRIP, що може включати у себе як застосування алгоритмів з глобальним порогом, так і алгоритмів з адаптивним порогом адаптовані до адитивної колірної схеми матриці зображення.

3. Застосування морфологічних алгоритмів PRIP, що включає у себе процедуру дилатації, процедуру ерозії та виділення границь з подальшою адаптацією до адитивної колірної схеми матриці зображення.

4. Виділення зв'язних компонент матриці зображення, що включає у себе вибір графічного примітиву та формування багаторівневої класифікації з подальшою адаптацією до адитивної колірної схеми матриці зображення.

5. Проведення попередньої сегментації матриці зображення програмними алгоритмами на основі методу водоподілу.

При цьому в основі побудови цілісної методики відновлення та попередньої сегментації матриці цифрового зображення лежить адаптація зазначених підходів, що може бути застосована у середовищі апаратно-програмної платформи UAV у відповідності до обмеження обчислювального ресурсу та необхідності обробки поточкових даних у режимі реального часу.

2. Впровадження порогових методів при побудові програмних алгоритмів PRIP

Застосування порогових алгоритмів PRIP матриці цифрового зображення є базовим підходом відновлення та налаштування вхідних даних. У основі зазначеного алгоритму лежить циклічне повторення наступного набору процедур: (i) визначення або уточнення порогового значення, що використовується у рамках порогового методу; (ii) попередня обробка зображення на базі порогового методу; (iii) перевірка складових елементів матриці зображення після застосування порогового методу. Визначення ефективності порогового алгоритму як складової PRIP, є поділення матриці зображення на області, для яких можна виділити тло та візуальний об'єкт.

При впровадженні зазначеної методики розробником порогового алгоритму у відповідності до поставленого завдання та обчислювального ресурсу апаратно-програмної платформи обирається схема з глобальним порогом або схема з адаптивним порогом. Якщо потокові дані системи фотореєстрації представлені набором матриць цифрових зображень у форматі «Gray Scale», кожен піксель матриці зображення $GS(x, y)$ визначається у межах $GS(x, y) \in [0; I]$. Якщо порогове значення у рамках застосування алгоритму PRIP визначається як TH , множина елементів $\{GS(x, y)\}$ може бути поділена на дві групи:

$$\begin{cases} \{GS_+(x, y)\} \text{ для } \forall GS(x, y) \geq TH \\ \{GS_-(x, y)\} \text{ для } \forall GS(x, y) < TH \end{cases} \quad (1)$$

причому кількість елементів у групі $\{GS_+(x, y)\}$ складає N_+ , кількість елементів у групі $\{GS_-(x, y)\}$ складає N_- , а загальна кількість елементів у групі $\{GS(x, y)\}$, відповідно, складає $N = N_- + N_+$.

Програмний алгоритм з глобальним порогом є простішим у програмній реалізації порівняно з алгоритмом з адаптивним порогом. Базова схема включає у себе виконання наступних етапів:

1. Вибір порогового значення TH .
2. Вибір мінімальної точності вибору порогового значення у відповідності до максимально допустимої величини абсолютної похибки ΔTH_{max} .
3. Поділ множини $\{GS(x, y)\}$ на підмножини $\{GS_+(x, y)\}$ і $\{GS_-(x, y)\}$ у відповідності до порогового значення TH .
4. Визначення середніх значень $\overline{GS}_+(x, y)$ і $\overline{GS}_-(x, y)$ для множин $\{GS_+(x, y)\}$ і $\{GS_-(x, y)\}$, відповідно.
5. Корекція порогового значення за формулою усереднення величин $\overline{GS}_+(x, y)$ і $\overline{GS}_-(x, y)$:
 $TH = (\overline{GS}_+(x, y) + \overline{GS}_-(x, y)) / 2$.
6. Перехід до пункту (3) при $TH > \Delta TH_{max}$ або завершення роботи алгоритму PRIP при $TH \leq \Delta TH_{max}$.

Програмний алгоритм з глобальним порогом показує низьку ефективність при $N_- \gg N_+$ або $N_- \ll N_+$. Це вказує на необхідність попередньої сегментації матриці цифрового зображення, через застосування алгоритму з адаптивним порогом або впровадження додаткових програмних алгоритмів попередньої сегментації.

Адаптація порогових алгоритмів PRIP для роботи з матрицею кольорового зображеннями представлено у відповідності до адитивної кольорової схеми RGB вимагає розширення процесу порогової обробки, оскільки кожен піксель складається з трьох компонентів. Таким чином, пороговий алгоритм має застосовуватися до кожного з кольірних каналів окремо або за комбінованими характеристиками пікселя:

– порогове значення обчислюється для кожного каналу як набір $\{TH_R; TH_G; TH_B\}$, що надає можливість поділити пікселі на відповідні групи за трьома критеріями, як то $R(x, y) < TH_R$, $G(x, y) < TH_G$, $B(x, y) < TH_B$;

– порогове значення обчислюється для комбінованої інтенсивності як функції від інтенсивності $R(x, y)$, $G(x, y)$ і $B(x, y)$ кольорного каналу, як то середнього арифметичного або вагового середнього.

Розрахунок порогового значення для комбінованої інтенсивності надає можливість суттєво зменшити навантаження на обчислювальний ресурс, але призводить до втрати значної частини інформації. Таким чином, впровадження порогових алгоритмів у апаратно-програмну платформу авіоники UAV має базуватися на експериментальному дослідженні ефективності кожного з підходів.

3. Впровадження морфологічних методів при побудові програмних алгоритмів PRIP

У основі морфологічних методів програмних алгоритмів PRIP лежить робота з матрицею монохромного зображення $M(x, y)$, елементи якої приймають одне з двох значень $M(x, y) \in \{0; 1\}$, вибором матриці графічного примітиву (Graphical Primitive; GP), що виражається на математичному рівні як $GP(x, y)$ і характеризується роздільною здатністю $X_{GP} \times Y_{GP}$, до яких застосовуються двомісні логічні оператори, як то диз'юнкція $M(x, y) \vee GP(x, y)$, кон'юнкція $M(x, y) \wedge GP(x, y)$, імплікація $M(x, y) \Rightarrow GP(x, y)$,

еквіваленція $M(x, y) \leftrightarrow GP(x, y)$ та антиеквіваленція $M(x, y) \oplus GP(x, y)$, що наведені у табл. 1, та одиницьний логічний оператор заперечення $M(x, y)$, що інвертує вхідне зображення.

Таблиця 1

Двомісні логічні оператори, що використовуються у морфологічних методах

$M(x, y)$	$GP(x, y)$	$M \vee GP$	$M \wedge GP$	$M \Rightarrow GP$	$M \leftrightarrow GP$	$M \oplus GP$
0	0	0	0	1	1	0
0	1	1	0	1	0	1
1	0	1	0	0	0	1
1	1	1	1	1	1	0

Базовими процедурами, що використовуються при впровадженні морфологічних методів у програмні алгоритми відновлення матриці монохромного зображення є дилатація та ерозія:

1. Процедура дилатації використовується з метою компенсації розривів у структурних елементах матриці монохромного зображення. Застосування відповідної процедури розширює межі об'єктів, заповнюючи проміжки між сусідніми пікселями. Для відновлення початкового розміру візуальних об'єктів після застосування процедури дилатації має бути застосована процедура ерозії.

2. Процедура ерозії використовується з метою видалення артефактів, що є меншими за структурні елементи матриці монохромного зображення. Застосування відповідної процедури звужує області візуальних об'єктів об'єктами, видаляючи ізольовані пікселі. Для відновлення початкового розміру візуальних об'єктів після застосування процедури ерозії має бути застосована процедура дилатації.

Зазначені процедури використовуються для контурного виділення границь матриці монохромного зображення та інших актуальних програмних алгоритмів PRIP.

Адаптацію процедур ерозії та дилатації для роботи з матрицею кольорового зображення у рамках дослідження пропонується проводити у відповідності до одного з наступних методів:

1. Канальна обробка зображення. Кожен колірний канал обробляється як окреме монохромне зображення. Після цього оброблені канали об'єднуються, відновлюючи вихідне кольорове зображення.

2. Обчислення мінімуму і максимуму. Для процедури дилатації визначається максимальне значення пікселів для кожного каналу в межах структурного елемента, тоді як для ерозії – мінімальне значення. Це допомагає зберегти початкові налаштування матриці зображення, уникаючи появи артефактів на границях візуальних об'єктів.

Представлені підходи з адаптації морфологічних процедур для матриці кольорового зображення дозволяє зберегти цілісність візуальних об'єктів і мінімізувати спотворення колірної схеми, за умов мінімізації навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи UAV.

4. Визначення зв'язних компонент при побудові програмних алгоритмів PRIP

Процедура визначення зв'язних компонент між структурними елементами матриці цифрового зображення можна розглядати як попередній етап виділення візуальних елементів і сегментації. Показник зв'язності визначається через відповідність параметрів сусідніх компонентів, що, очевидно, включає у себе формалізацію на математичному рівні показників відповідності та близькості структурних елементів.

Для матриці монохромного зображення $M(x, y)$ множина CC_i зв'язних компонент (Connected Components; CC) визначається по відношенню до сусідніх компонент для початкової координати $\{x_0; y_0\}$, що представляють собою область $\{M_0(x, y)\}$, зв'язність яких оцінюється за допомогою графічного примітиву як двовимірної матриці $GP(x, y)$ з застосуванням таких двомісних логічних операторів як кон'юнкція і антиеквіваленція:

$$CC_i = (CC_{i-1} \oplus GP) \wedge M_0 \text{ для } i \in [1; I]. \tag{2}$$

Процедура визначення зв'язних компонент між структурними елементами матриці кольорового зображення може бути реалізована аналогічним чином з врахуванням не тільки просторової відстані, але й характеристик сусідніх пікселів. Зв'язні компоненти визначаються для кожного з колірних каналів оемо, з подальшою інтеграцією отриманих результатів для формування єдиного представлення. Відповідно, зв'язність компонент оцінюється на основі порівняння кольорових значень сусідніх пікселів у трьох каналах. При цьому $GP(x, y)$ залишається графічним примітивом, але для кольорового зображення оператори кон'юнкції та антиеквіваленції застосовуються до кожного з колірних каналів, що дозволяє отримати комплексне уявлення про зв'язність на основі всіх трьох кольорових компонент.

5. Впровадження методу водоподілу при побудові програмних алгоритмів попередньої сегментації

Впровадження методу водоподілу при побудові програмних алгоритмів попередньої сегментації включає у себе виявлення та усунення розривів у границях областей, порогова обробка матриці зображення та обробку областей. Для пікселів матриці цифрового зображення у форматі «Gray Scale» визначаються набір елементів $\{GS_{\uparrow}(x, y)\}$ з максимальним значенням $GS(x, y) = I_{max}$, набір елементів $\{GS_{\downarrow}(x, y)\}$ з мінімальним значенням $GS(x, y) = I_{min}$ і набір елементів $\{GS_{\uparrow\downarrow}(x, y)\}$, що лежить у межах $I_{min} < GS(x, y) < I_{max}$. Кількість елементів для кожної групи складає N_{\uparrow} , N_{\downarrow} і $N_{\uparrow\downarrow}$, відповідно, причому загальна кількість складає суму відповідних значень $N = N_{\uparrow} + N_{\downarrow} + N_{\uparrow\downarrow}$. Процедура попередньої сегментації методом водоподілу базується на розширенні областей $\{GS_{\downarrow}(x, y)\}$ через застосування процедури дилатації. При перетині границь підмножин $\{GS_{\downarrow}(x, y)\}$ на місці їх перетину утворюються елементи множини границь $\{GS_B(x, y)\}$, по відношенню до яких процедура дилатації не застосовується. Для уникнення надлишкової сегментації, що пов'язана з дефектами зображення, кількість областей обмежується через введення маркерів як зв'язних компонент елементів. При адаптації методу водоподілу для кольорових зображень, кожен колірний канал розглядається окремо як матриця у форматі «Gray Scale», для якої застосовується процедура сегментації. Завдяки цьому адаптованому підходу, можливе зменшення надлишкової сегментації кольорових зображень шляхом введення додаткових маркерів для виділення структурних компонентів структурних об'єктів в кожному колірному каналі, що забезпечує підвищену точність сегментації.

Висновки. У результаті проведеного дослідження було проаналізовано особливості відновлення та попередньої сегментації матриці цифрового зображення програмними методами у відповідності до адитивної колірної схеми системи фотореєстрації.

При цьому у рамках дослідження було:

- проведено постановку задачі відновлення та попередньої сегментації матриці цифрового зображення;
- визначено особливості застосування порогових методів при побудові програмних алгоритмів попередньої обробки матриці цифрового зображення;
- визначено особливості застосування морфологічних методів при побудові програмних алгоритмів попередньої обробки матриці цифрового зображення;
- визначено особливості визначення зв'язних компонент при побудові програмних алгоритмів попередньої обробки матриці цифрового зображення;
- визначено особливості впровадження методу водоподілу при побудові програмних алгоритмів попередньої сегментації матриці цифрового зображення.

Список використаних джерел:

1. A UAV Detection Algorithm Based on an Artificial Neural Network / Zhang H., Cao C., Xu L., Gulliver T. A. *IEEE Access*. 2018. № 6. P. 24720–24728.
2. Bomfin R., Chafii M., Fettweis G. Performance assessment of orthogonal Chirp Division Multiplexing in MIMO space time coding. *2019 IEEE 2nd 5G World Forum (5GWF)*. 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/5gwf.2019.8911635>.
3. Collins W. Tracking Extremes in Exascale Simulations Utilizing Exascale Platforms. *Exascale Systems*. 2021. DOI: <https://doi.org/10.2172/1769788>.
4. Deep Sat V2: feature augmented convolutional neural nets for satellite image classification / Liu Q., Basu S., Ganguly S., Mukhopadhyay S., DiBiano R., Karki M., Nemani R. *Remote Sensing Letters*. 2019. № 11 (2). P. 156–165.
5. Dinc S., Parra L. A three-layer spatial-spectral hyperspectral image classification model using guided median filters. *Proceedings of the 2021 ACM Southeast Conference*. 2021. № 7. P. 122–129. DOI: <https://doi.org/10.1145/3409334.3452045>.
6. Feng L., Wang J. Research on image denoising algorithm based on improved wavelet threshold and non-local mean filtering. *2021 IEEE 6th International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)*. 2021. P. 493–497. DOI: <https://doi.org/10.1109/icsip52628.2021.9688900>.
7. Huang C., Nguyen M. X-Ray Enhancement Based on Component Attenuation, Contrast Adjustment, and Image Fusion. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2019. № 28 (1). P. 127–141. DOI: [10.1109/tip.2018.2865637](https://doi.org/10.1109/tip.2018.2865637).
8. Huang C., Nguyen M. X-Ray Enhancement Based on Component Attenuation, Contrast Adjustment, and Image Fusion. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2019. № 28 (1). P. 127–141. DOI: [10.1109/tip.2018.2865637](https://doi.org/10.1109/tip.2018.2865637).
9. Karim T., Tasneem T. Analytical Adjustment of Image Contrast. *International Journal of Computer Applications*. 2014. № 98 (20). P. 44–49. DOI: [10.5120/17303-7794](https://doi.org/10.5120/17303-7794).
10. Kim Y. W. Multi-GPU server design parameters selection based on empirical observation of HPL behavior. *2021 36th International Technical Conference on Circuits / Systems, Computers and Communications (ITC-CSCC)*. 2021. P. 1–4. DOI: <https://doi.org/10.1109/itc-csc52171.2021.9501469>.
11. Lake B. M., Salakhutdinov R., Tenenbaum J. B. Human-level concept learning through probabilistic program induction. *Science*. 2015. № 350 (6266). P. 1332–1338.

12. Lee S., Kim T., Choi Y. Pseudo-RGB-based place recognition through thermal-to-RGB image translation. *Journal of Korea Robotics Society*. 2023. № 18 (1). P. 48–52. DOI: <https://doi.org/10.7746/jkros.2023.18.1.048>.
13. Purwono N., Syetiawan A. Application of UAV with fish-eye lenses camera for 3D surface model reconstruction application of UAV with fish-eye lenses camera for 3D Surface Model Reconstruction. *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*. 2018. № 5 (1). P. 115. DOI: <https://doi.org/10.14710/geoplanning.5.1.115-130>.
14. Ren Y., Tang L. A nonconvex and nonsmooth anisotropic total variation model for image noise and blur removal. *Multimedia Tools and Applications*. 2019. № 79 (1–2). P. 1445–1473. DOI: [10.1007/s11042-019-08179-8](https://doi.org/10.1007/s11042-019-08179-8).
15. Seelamantula C. S., Blu T. Image denoising in multiplicative noise. *2015 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2015. DOI: [10.1109/icip.2015.7351056](https://doi.org/10.1109/icip.2015.7351056).
16. Sone Y., Yamamoto S. Latest trends in 400 – and beyond 400-Gbit / s ethernet standardization in IEEE 802.3. *NTT Technical Review*. 2021. № 19 (10). P. 61–66. DOI: <https://doi.org/10.53829/ntr202110gls>.
17. Suzuki Y., Ozaki T. Stacked Denoising Autoencoder-Based Deep Collaborative Filtering Using the Change of Similarity. *2017 31st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA)*. 2017. DOI: [10.1109/waina.2017.72](https://doi.org/10.1109/waina.2017.72).
18. Vincent L., Heijmans H. Graph Morphology in Image Analysis. *Mathematical Morphology in Image Processing*. 2018. P. 170–203. DOI: [10.1201/9781482277234-6](https://doi.org/10.1201/9781482277234-6).
19. Wierzbicki D. Multi-camera Imaging System for UAV photogrammetry. *Sensors*. 2018. № 18 (8). P. 2433. DOI: <https://doi.org/10.3390/s18082433>.
20. Zghidi H., Świtoński A., Drażek G. Multispectral image filtering using the mean shift algorithm. *AIP Conference Proceedings*. 2015. № 1648. P. 850057. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4913112>.
21. Zhang C., Liu W., Xing W. Color image enhancement based on local spatial homomorphic filtering and gradient domain variance guided image filtering. *Journal of Electronic Imaging*. 2018. № 27 (06). P. 1. DOI: [10.1117/1.jei.27.6.063026](https://doi.org/10.1117/1.jei.27.6.063026).

УДК 004.65

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.3.2>

Володимир КОЗУБ

магістр за спеціальністю «Системи захисту від несанкціонованого доступу», Національний авіаційний університет, volodymyr.kozub85@gmail.com

ORCID: 0009-0007-6740-5300

ТЕХНОЛОГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБЕРІГАННЯ У NO-SQL БАЗАХ ДАНИХ

Анотація. У статті представлено результати використання методів дедуплікації і стиснення для оптимізації зберігання даних у хмарних No-SQL базах даних.

Метою роботи є зменшення обсягу даних, що зберігаються, за рахунок використання технології Hadoop MapReduce для обробки інформації та MongoDB для зберігання агрегованих пар ключ-значення.

Методологія. Дослідження базується на комбінації дедуплікації та стиснення даних, виконаних за допомогою Hadoop MapReduce. Цей підхід дозволяє обробляти великі обсяги інформації, оптимізуючи процеси зберігання в MongoDB.

Результати. Проведено серію експериментів для оцінки зменшення обсягів даних та перевірки швидкості обробки запитів. Запропонована архітектура системи демонструє легкість інтеграції з існуючими інструментами резервного копіювання, що робить цю технологію практичною для впровадження в реальних умовах. Результати експериментів свідчать про високу ефективність застосування даних технологій для великих файлів, що дозволяє зменшити вимоги до сховища на понад 90%.

Наукова новизна. Запропоноване рішення впроваджує інноваційний підхід до обробки та зберігання даних у хмарних середовищах. Вперше в контексті No-SQL баз даних об'єднуються методи дедуплікації та стиснення, що створює нові можливості для економії місця і підвищення продуктивності систем. Дослідження розширює застосування цих методів, включаючи потенціал для мультимедійних файлів та потокових даних у реальному часі.

Висновки. Отримані результати свідчать про високу ефективність використання технології дедуплікації та стиснення для зменшення обсягів даних у хмарних No-SQL базах. Впровадження даних методів дозволяє значно знизити витрати на зберігання, підвищити швидкість обробки даних та адаптуватися до зростаючих потреб сучасних індустрій. Наступні етапи дослідження включатимуть розробку прогностичних моделей для оптимізації застосування технологій у реальному часі, що відкриває нові горизонти в управлінні даними.

Ключові слова: No-SQL бази даних, дедуплікація даних, стиснення даних, оптимізація хмарного зберігання, ефективність зберігання.

Volodymyr KOZUB. TECHNOLOGY FOR IMPROVING STORAGE EFFICIENCY IN NO-SQL DATABASES

Abstract. The article presents the results of using deduplication and compression methods to optimize data storage in cloud No-SQL databases.

The purpose of the article is to reduce the volume of stored data by using Hadoop MapReduce technology for information processing and MongoDB for storing aggregated key-value pairs.

Methodology. The study is based on a combination of data deduplication and compression performed using Hadoop MapReduce. This approach allows you to process large amounts of information by optimizing storage processes in MongoDB.

Results. A series of experiments was conducted to evaluate the reduction of data volumes and check the speed of processing requests. The proposed system architecture demonstrates ease of integration with existing backup tools, making this technology practical for implementation in real-world environments. The results of the experiments indicate the high efficiency of the application of these technologies for large files, which allows to reduce storage requirements by more than 90%.

Scientific novelty. The proposed solution introduces an innovative approach to data processing and storage in cloud environments. For the first time in the context of No-SQL databases, deduplication and compression methods are combined, which creates new opportunities for saving space and increasing system performance. The research extends the applications of these techniques to include the potential for multimedia files and real-time streaming data.

Conclusions. The obtained results testify to the high efficiency of using deduplication and compression technology to reduce data volumes in cloud-based No-SQL databases. The implementation of these methods allows you to significantly reduce storage costs, increase the speed of data processing and adapt to the growing needs of modern industries. The next stages of research will include the development of predictive models to optimize the application of technologies in real time, which opens new horizons in data management.

Key words: No-SQL database, data deduplication, data compression, cloud storage optimization, storage efficiency.

Вступ. Постановка проблеми. Сьогодні хмарні обчислення змінили способи управління, а також зберігання даних. Натепер пропонуються гнучки, масштабовані та ефективні рішення, які використовують Інтернет. Так як обсяги даних продовжують зростати в геометричній прогресії, аутсорсинг управління базами даних у хмарних середовищах став важливим компонентом сучасних бізнес-стратегій. Ті ж самі популярні соціальні медіаплатформи, такі як Facebook і Twitter, кожного дня генерують великий обсяг даних, який обраховується сотнями терабайтів на день, а фондові біржі обробляють потоки даних, які більше, ніж терабайт на годину.

Всі ці величезні обсяги даних вимагають постійного збереження, оновлення, синхронізації, що обумовлює використання хмарних платформ, які дозволяють компаніям позбутися власних серверів і перейти повністю на використання аутсорс систем збереження даних. Цей крок давно економічно обґрунтований і є більш вигідним для компанії, ніж підтримка власних технічних і програмних рішень для роботи з масивами даними. Простота збереження великих обсягів даних також несе за собою і негативний фактор, компанії виявилось простіше працювати з неструктурованими і напівструктурованими даними, що викликає великі труднощі для традиційних реляційних систем керування базами даних (СКБД). Платформи СКБД здебільш розроблені для структурованих даних і направлені на прискорені роботу з ними, в той час як нереляційні системи (No-SQL системи (Not only SQL)) намагаються відмовитись від прийнятих рішень в реляційних СКБД. No-SQL бази даних вирішують задачі масштабованості і гнучкості через інструменти підтримки кінцевої узгодженості, які увійшли в концепцію BASE («базова доступність» («basically available»), «м'який стан» («soft state»), «кінцева узгодженість» («eventual consistency»)), та роблять їх придатними для розподілених хмарних мереж і реалізації додатків для роботи в режимі реального часу.

Однак велика кількість дубльованих даних у таких системах викликає нові труднощі, зокрема зростання витрат на їх зберігання. Коли потрібно керувати великим обсягом скопійованих даних, вартість зберігання збільшується, а загальна ефективність роботи системи може знижуватися. Окрім цього, із ростом обсягів даних організації стикаються з викликами, пов'язаними з розширенням систем, забезпеченням їхньої безпеки та сумісності. Для вирішення цих проблем компанії комбінують локальні сховища даних із хмарними резервними копіями, а також застосовують передові методи управління даними. Одними з найбільш дієвих підходів є видалення дубльованих даних (дедуплікація) і стиснення, що зменшує розмір збереженої інформації. Це дозволяє суттєво економити місце у сховищах і мережеві ресурси.

Пропонується застосовувати для покращення зберігання даних у хмарних базах No-SQL методи дедуплікації (усунення дублювань) і стиснення, щоб зменшити зайві дані та оптимізувати зберігання. Це виконується за рахунок використання платформи MapReduce, яка видаляє дублікати з даних розподіленої файлової системи Hadoop (HDFS), що формує унікальні записи у форматі «ключ-значення». А вже перетворені записи зберігаються в No-SQL базі даних MongoDB. Після цього дані стискаються за допомогою алгоритму Gzip, що ще більше зменшує обсяг необхідного для них місця та підвищує швидкість передачі даних між різними вузлами в хмарі.

Інтеграція можливостей великомасштабної обробки даних Hadoop із гнучкою структурою MongoDB дозволяє в новому підході пропонувати ефективні рішення для роботи з великими обсягами інформації в розподілених хмарних середовищах та знижувати витрати на зберігання даних без втрат в загальній продуктивності системи.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Недавні дослідження широко досліджували застосування методів дедуплікації в хмарних системах зберігання, використовуючи такі концепції, як хешування та MapReduce для оптимізації керування даними. Рой-Хубара та Штурм підкреслили, що традиційні методи проектування є неадекватними для сучасних середовищ баз даних, особливо з точки зору адаптивності та масштабованості [1]. Їх систематичний огляд виявив прогалини у вирішенні нефункціональних вимог, які є критичними для продуктивності розподілених систем.

Рамзан та ін. досліджували основні проблеми, з якими стикається розподілене зберігання в No-SQL, включаючи узгодженість, затримку, пропускну здатність і безпеку [2]. Їх систематичний огляд підкреслив важливість таких методів, як індексування, кешування та хешування, для підвищення продуктивності високонавантажених систем. Ці проблеми актуальні в додатках із великомасштабною реплікацією даних і обробкою запитів, де навіть невелика неефективність може призвести до значного зниження продуктивності системи. Вони запропонували кілька підходів до вирішення цих проблем, зосередившись на балансуванні навантаження системи та оптимізації запитів.

Кім і Лі досліджували стратегії дедуплікації даних для підвищення ефективності зберігання, забезпечуючи при цьому цілісність і конфіденційність даних [3]. Їх робота підкреслила проблеми сумісності між методами шифрування та дедуплікації, підкресливши необхідність безпечних методів, які не впливають на продуктивність. Це важливо в хмарних середовищах із високим навантаженням, де безпека даних так само важлива, як і оптимізація зберігання.

Кумар та ін. представив покращений підхід для дедуплікації з використанням диференціальної еволюції в системах зберігання великих даних [4]. Їхній метод значно покращує як пропускну здатність, так і коефіцієнт дедуплікації, що робить його життєздатним рішенням для керування великомасштабними системами розподілених даних. Їх результати продемонстрували значне покращення використання сховища, особливо в хмарних і розподілених середовищах.

Банг та ін. надав ширший огляд методів дедуплікації, наголошуючи на зменшенні простору для зберігання та покращеному управлінні даними [5]. Вони проаналізували продуктивність алгоритмів дедуплікації в різних хмарних середовищах зберігання, наголошуючи на масштабованості як критичному факторі успіху у великих системах. У документі також обговорюється компроміс між точністю дедуплікації та продуктивністю системи, що є критичним фактором у середовищах із високим трафіком.

Чжан та ін. заглибились у методи дедуплікації, що використовуються в хмарних системах, порівнюючи сильні та слабкі сторони різних методів [6]. Вони підкреслили застосовність і ефективність цих методів у сценаріях реального світу, де обсяг даних і моделі доступу динамічно змінюються. Їх огляд показав, як різні підходи до дедуплікації впливають на час відгуку системи та економію місця для зберігання.

Огляд рішень в роботі [7-9] окреслив ключові проблеми масштабованості, безпеки та ефективності, пропонуючи потенційні рішення для подолання складності, притаманної хмарній дедуплікації та запропонував компромісні рішення між глибиною дедуплікації та споживанням системних ресурсів, пропонуючи масштабовані методи, які оптимізують обидва показники.

Коушик та ін. розглянули технічні вузькі місця, що виникають через дедуплікацію даних, такі як обмеження дискового введення/виведення та керування метаданими [10]. У своїй роботі вони представили інноваційні рішення для подолання цих перешкод, включаючи оптимізовані алгоритми та масштабовані методи індексування, які мають вирішальне значення для підтримки високої продуктивності та ефективності системи у великомасштабних хмарних середовищах. Вони підкреслили важливість дедуплікації в режимі реального часу в системах реального часу, особливо там, де навантаження системи та пропускну здатність даних постійно змінюються.

Поєднання цих методів вирішує проблеми оптимізації зберігання, покращуючи продуктивність системи, використання пропускну здатності та безпеку даних у хмарних і розподілених середовищах.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз технології підвищення ефективності зберігання даних у хмарних No-SQL за рахунок оптимізації процесу зберігання і зменшення надмірності даних. Передбачається, що використання паралельної обробки через Hadoop MapReduce та MongoDB для зберігання унікальних пар ключ-значення дозволить суттєво зменшити обсяг даних, що передаються, і збільшити пропускну здатність мережі.

Виклад основного матеріалу.

Загальний підхід до використання No-SQL баз даних в хмарних обчисленнях. Практичне використання No-SQL баз даних у хмарних обчисленнях дозволяє досягати високої швидкості обробки та масштабування даних для додатків із великим навантаженням. Це обумовлено основними можливостями No-SQL баз даних: горизонтальне масштабування на вимогу; резервування та реплікація даних; гнучке управління ресурсами; оптимізація запитів і кешування; автоматизація процесів резервного копіювання; моніторинг та налаштування тривоги.

Горизонтальне масштабування передбачає автоматичне додавання нових вузлів, коли обсяг запитів зростає, що забезпечує стабільну роботу без втрати швидкості обробки. Дані автоматично дублюються на кількох вузлах, щоб забезпечити доступність навіть при відмовах (цей процес налаштовується таким чином, щоб зменшити ризик втрати даних і забезпечити швидке відновлення після збою).

Для економії ресурсів No-SQL бази налаштовуються з урахуванням поточного навантаження, щоб автоматично масштабуватися вгору або вниз, забезпечуючи мінімальну кількість активних вузлів при зменшенні обсягу запитів. Налаштування кешування та оптимізація запитів забезпечують мінімальні затримки доступу до даних, особливо для найбільш запитуваної інформації. Це дозволяє зменшити навантаження на основну базу та підвищити швидкість відповіді.

У хмарі легко налаштувати регулярне резервне копіювання, яке автоматично зберігає дані на окремих серверах, що забезпечує додатковий рівень захисту даних і швидке відновлення в разі непередбачуваних ситуацій. За допомогою хмарних інструментів проводиться моніторинг продуктивності No-SQL бази даних. А налаштовані тривоги дозволяють оперативно реагувати на потенційні проблеми (перевантаження або збої у доступності) ще до того, як їх вплив на систему досягне критичного.

Однак одна з проблем баз даних No-SQL полягає в їх сильно денормалізованій структурі, що призводить до значних обсягів надлишкових даних. Зі збільшенням обсягу надлишкових даних організаціям стає все складніше ефективно управляти ними. Це робить вкрай необхідним використання інструментів і стратегій для підвищення ефективності зберігання даних. Досягнення цієї мети може значно знизити операційні витрати, що актуально з огляду на стрімке зростання як мережевих вимог, так і ресурсів, необхідних для зберігання і передачі даних.

Для вирішення цих проблем вагому роль відіграють такі технології, як дедуплікація та стиснення. Усуваючи дублікати даних і зменшуючи розмір файлів, що зберігаються, ці методи можуть дати значну

економію в обсязі необхідного сховища. Оскільки обсяги даних продовжують зростати в геометричній прогресії, особливо в хмарних системах, які обробляють терабайти інформації, застосування цих методів стає необхідним для підтримки економічно ефективних і масштабованих рішень для управління даними.

Системна архітектура запропонованої технології. Архітектура запропонованої технології складається з декількох рівнів, які показано на рисунку 1. Процес починається з отримання даних із розподіленої файлової системи Hadoop (HDFS). HDFS спеціально створена для того, щоб зберігати дуже великі обсяги інформації, які розподіляються між багатьма комп'ютерами, об'єднаними в кластер.

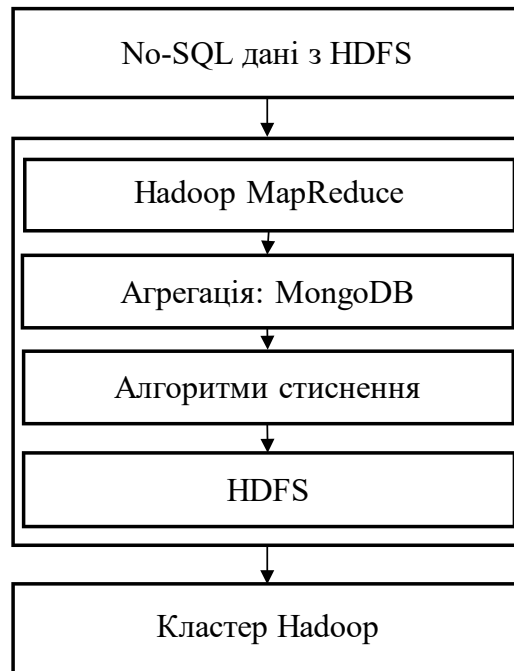


Рис. 1. Системна архітектура запропонованої технології

У кожному з цих комп'ютерів або «вузлів» зберігається частина даних, що дозволяє обробляти величезні файли, які можуть займати від сотень мегабайт до кількох терабайт. Завдяки тому, що дані розподілені між багатьма вузлами, система може легко збільшувати обсяги зберігання, додаючи нові комп'ютери в кластер. Це робить HDFS ідеальним вибором для середовищ, де потрібно обробляти та зберігати великі масиви інформації, як-от в аналітичних системах чи платформах для обробки великих даних.

У хмарних середовищах дані зберігаються у вигляді плоских текстових файлів, що може призвести до значних накладних витрат на здатність операційної системи отримувати дані і на управління ними, а це робить даний формат непрактичним для роботи з великими наборами даних. Традиційні реляційні бази даних не мають необхідних інструментів для ефективною обробки таких обсягів, але цю проблему вирішує фреймворк MapReduce за рахунок можливості паралельної обробки.

Після завершення процесу видалення дублікатів дані зводяться до набору пар «ключ-значення», які зберігаються у вигляді таблиці. Для цього використовується MongoDB – No-SQL база даних, що працює з документами. Завдяки документній структурі MongoDB можна легко працювати зі складними даними, адже документи можуть включати вкладені ключі та значення, а також масиви, що дуже зручно для зберігання багаторівневих чи багатомісних даних.

Далі відбувається стиснення даних, щоб оптимізувати їх зберігання. Стиснуті файли знову зберігаються у HDFS, що суттєво зменшує загальний обсяг пам'яті, яку займають дані. Це не лише економить простір для зберігання, але й робить передачу між вузлами більш ефективною, оскільки зменшені файли потребують менше мережевих ресурсів. Завдяки поєднанню методів видалення дублікатів, структурованого зберігання в MongoDB та стиснення забезпечується ефективне управління великими обсягами даних, оптимізуючи як зберігання, так і мережеву передачу.

Експеримент. Відкритість платформ Hadoop та MongoDB дозволяє самостійно не тільки налаштувати модулі, а й переписувати коди окремих компонентів. У дослідженні використовувалися версії

Hadoop 3.4.0 і MongoDB 7.0, розгорнуті на 64-розрядній системі Ubuntu, яка підтримує завантаження двох операційних систем. Комп'ютер має 16 ГБ оперативної пам'яті та 500 ГБ жорсткого диска, налаштованого для роботи з розподіленою файловою системою.

Після налаштування Hadoop і MongoDB додано бібліотеки для стиснення даних за допомогою алгоритму GZip, щоб зробити зберігання більш ефективним. Усі процеси запускалися в середовищі розробки Eclipse Juno, де були інтегровані необхідні бібліотеки для роботи з Hadoop і MongoDB. Для оцінки використання пропускну здатності було також підключено клієнтську систему з такою ж конфігурацією. На рисунку 2 показано весь процес роботи в Hadoop HDFS.

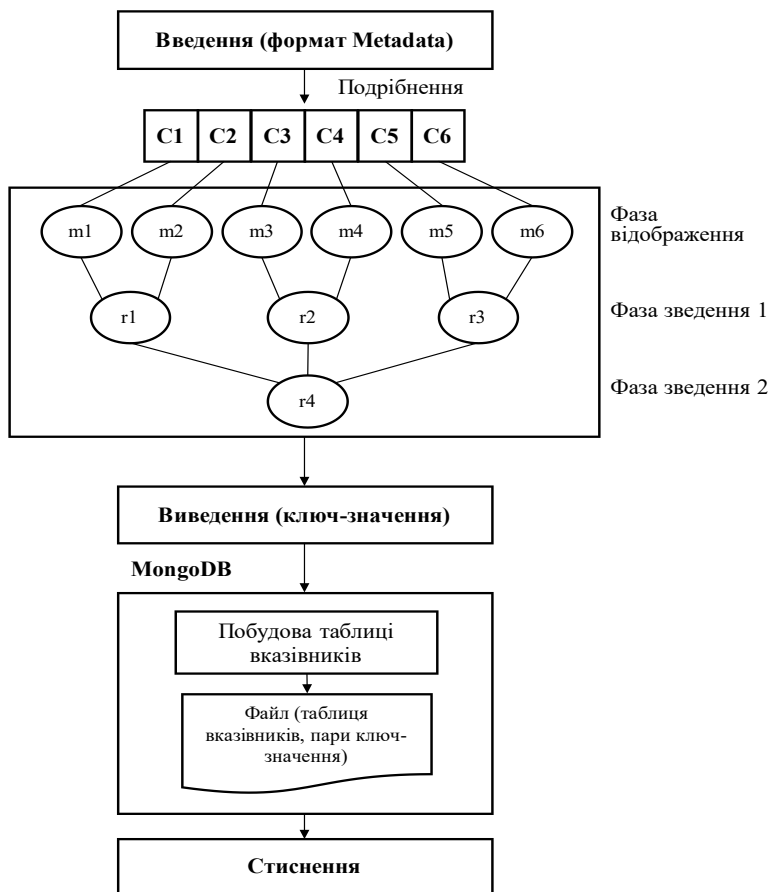


Рис. 2. Фаза виконання процесу Hadoop HDFS

Спершу вхідні дані завантажуються з HDFS, представлені у вигляді метаданих, пов'язаних із текстовими файлами. Ці метадані допомагають розбивати записи на фрагменти для дедуплікації, що дозволяє порівнювати лише однорідні типи даних, підвищуючи ефективність процесу. Отримані фрагменти змінного розміру потім обробляються на етапі MapReduce для видалення дублікатів даних.

Процес дедуплікації передбачає розбиття потоку даних на файли змінної довжини і запис їх на диск. Кожному сегменту присвоюється унікальний цифровий підпис за допомогою хешування md5, що допомагає ідентифікувати дублікати даних. Процес дедуплікації керується за допомогою фреймворку MapReduce, який працює за архітектурою master-slave. Головний вузол призначає робочим вузлам завдання зі створення мапи та редукції, гарантуючи, що всі релевантні сегменти даних будуть оброблені ефективно. На етапі відображення Hadoop хешує ключі і гарантує, що всі значення, пов'язані з певним ключем, будуть спрямовані до відповідного редуктора. Це забезпечує дедуплікацію як на рівні файлів, так і на рівні підфайлів.

В момент, коли головний вузол ініціює завдання, робочі вузли паралельно виконують відповідну карту або зменшують завдання. MapReduce інтерпретує дані під час обробки, причому завдання починається з розділення вхідних даних і призначення кожної частини окремим завданням карти. Після того, як робочий вузол завершує завдання відображення, проміжні пари ключ-значення, згенеровані завданням, зберігаються в пам'яті.

Фаза редукації починається зі збору всіх проміжних результатів з вихідних даних карти, застосовуючи функцію редукації для консолідації даних. Щоб підвищити ефективність зберігання та скоротити час обробки, проміжні пари ключ-значення з кожної задачі картографування не зберігаються окремо. Замість цього дані залишаються в пам'яті і передаються безпосередньо до редукторів, усуваючи непотрібні перетворення і прискорюючи процес виконання. Цей же принцип застосовується між редукторами, де дані передаються без перетворення в пари ключ-значення до останнього кроку редукації.

Після етапу MapReduce результати зберігаються в MongoDB завдяки її високій продуктивності та масштабованості. MongoDB особливо добре підходить для No-SQL додатків завдяки своїй структурі на основі документів, яка групує записи в колекції документів. Кожен документ функціонує як пара ключ-значення, ідентифікована унікальним ідентифікатором, згенерованим за допомогою хешування. У цьому випадку таблиця покажчиків створюється шляхом об'єднання всіх пар ключ-значення в документ MongoDB. Документно-орієнтована структура зберігання забезпечує легкий пошук та інтеграцію, дозволяючи відтворити оригінальний файл, зібравши дані з таблиці покажчиків.

Hadoop забезпечує відмінну продуктивність читання і запису, з вбудованою підтримкою ряду алгоритмів стиснення, які можуть бути обрані на основі специфіки даних в No-SQL додатках. Хоча стиснення допомагає економити місце на диску, воно може призвести до дещо більшого використання процесора на етапах стиснення і розпакування даних під час читання і запису. В запропонованому рішенні використовується алгоритм стиснення GZIP, щоб максимально заощадити місце на диску. GZIP, частина власної бібліотеки Hadoop, покладається на алгоритм DEFLATE, який поєднує в собі кодування Хаффмана та методи стиснення LZ77. Цей алгоритм забезпечує швидку декомпресію, гарантуючи, що файли можуть бути легко відновлені з мінімальним часом обробки.

Результати експерименту. Для експерименту створені тестові дані з урахуванням їх розміру, надмірності та складності кортежів, які склалися з 12 текстових файлів із різними характеристиками. Щоб оцінити ефективність запропонованої технології підвищення ефективності зберігання у No-SQL базах даних, виконувалися послідовні резервні копії баз даних до і після дедуплікації та стиснення, що дозволило точно порівняти розмір файлів. Розмір кожного файлу також фіксувався після тестів із записами різного обсягу, як показано в Таблиці 1.

Таблиця 1

Порівняння за розмірами файлів

Розмір файлу (Кб)	Кількість рядків	Розмір файлу після дедуплікації	Розмір файлу після дедуплікації та стиснення
26 520,2	1000	20580,5	13520,8
55 290,7	2000	41990,1	24580,4
111 610,7	5000	75790,2	29710,0
231 420,4	10000	145 450,1	36880,6

Результати показали, що запропонована технологія особливо ефективна для обробки великих файлів, на відміну від файлів меншого розміру з аналогічним вмістом. Чим більше надлишкової інформації в наборі даних, тим краще запропоновані методи справляються з оптимізацією зберігання, особливо коли йдеться про великі обсяги даних.

Експерименти показують, що одна лише дедуплікація може звільнити понад 50% місця в сховищі, з потенціалом ще більшої економії при застосуванні стиснення поверх дедуплікованих даних. Фактично, понад 91% місця в сховищі можна заощадити, якщо повністю застосувати запроповану технологію до No-SQL сховища даних. Це візуально представлено на рисунку 3, який підкреслює різке зменшення розмірів файлів після застосування дедуплікації з подальшим стисненням.

З діаграм видно, що стиснення дає суттєву перевагу в подальшій мінімізації сховища після виконання дедуплікації в No-SQL середовищах. Ефективність економії пам'яті залежить від типу даних, що обробляються. Відповідно до словника SNIA, ефективність зберігання визначається як відношення ефективної ємності системи зберігання до її початкової ємності. Формула виглядає наступним чином:

$$\frac{fs - ls}{fs} \times 100,$$

fs – оригінальний розмір файлу;

ls – розмір файлу після дедуплікації та стиснення.

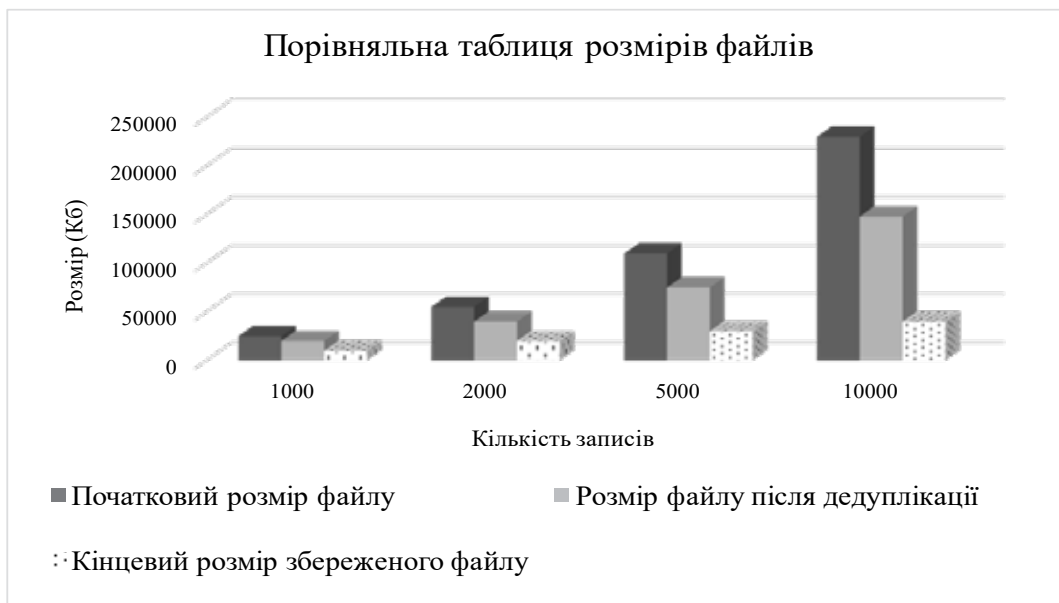


Рис. 3. Порівняння за розміром файлу

Рисунок 4 ілюструє підвищення ефективності зберігання даних після застосування дедуплікації та стиснення і показують, що запропоновані методи не тільки звільняють значний простір для зберігання, але й подвоюють економію, досягнуту лише завдяки дедуплікації. Загальний час обробки залежить як від розміру файлу, так і від кількості записів, що обробляються.

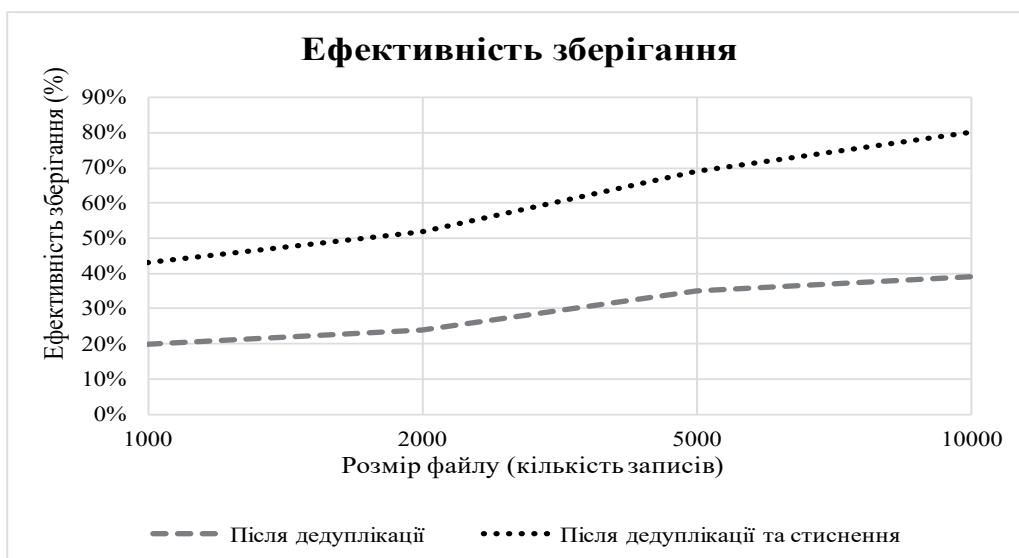


Рис. 4. Порівняння ефективності зберігання

На рисунку 5 показано відсоток ефективності зберігання для різних файлів баз даних з різною складністю кортежів (кількістю полів).

Експерименти, що проведені на файлах з різним структурним складом, показують кращу продуктивність зі збільшенням кількості структурної інформації. Для наборів даних зі складнішою структурою ефективність зберігання може досягати 90%, як показано на рисунку 5.

При реплікації даних між кількома вузлами запропонована технологія допомагає зменшити споживання пропускну здатності за рахунок стиснення файлів та усунення надлишкових даних. Це призводить до більш ефективного використання пропускну здатності, оскільки тільки необхідні дані

передаються на вимогу. На рисунку 6 графічно зображено економію пропускної здатності завдяки використанню запропонованої технології.

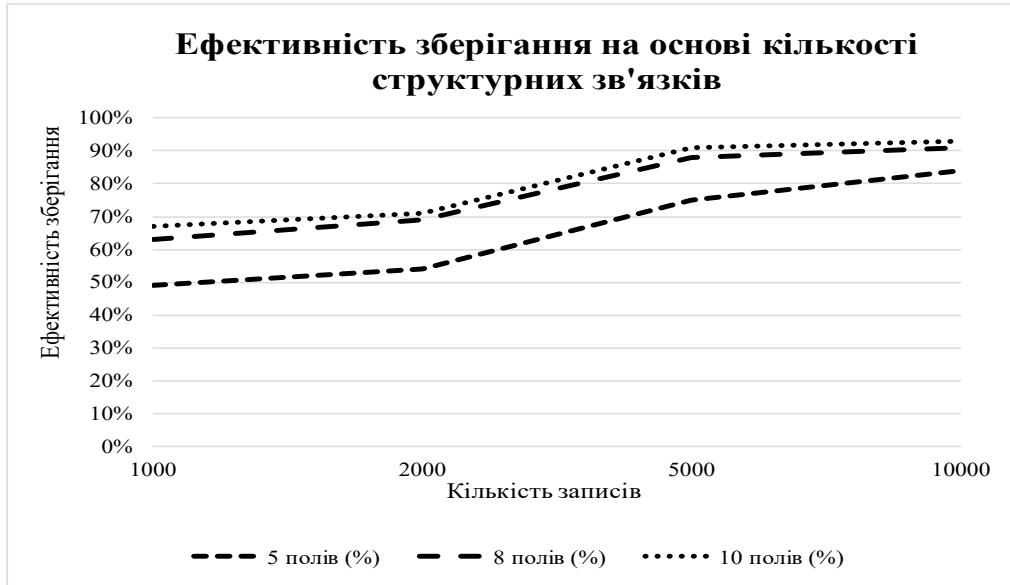


Рис. 5. Ефективність зберігання файлів з різною структурною інформацією

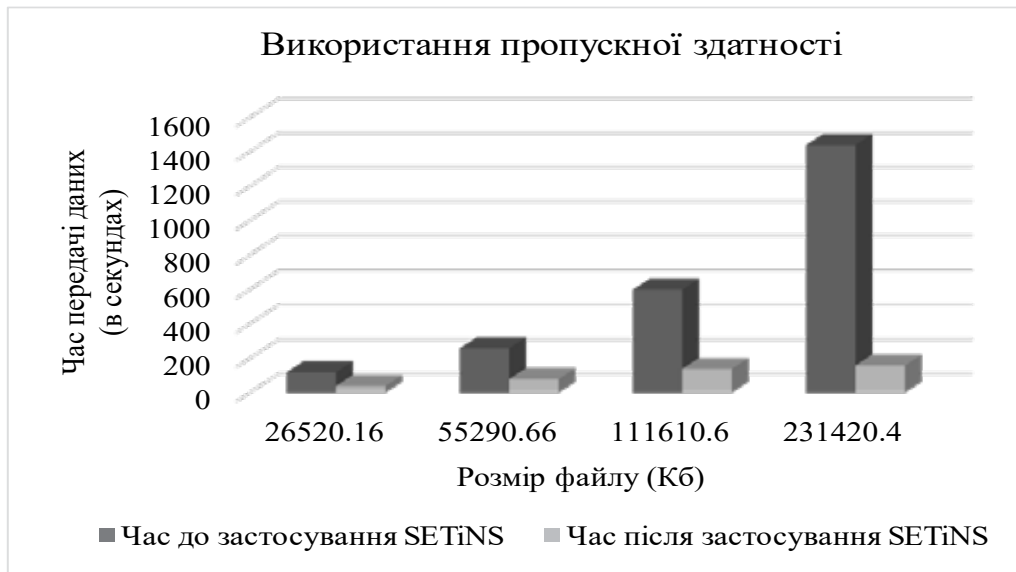


Рис. 6. Пропускна здатність під час міжвузлової передачі

Час, необхідний для передачі файлу від одного вузла до іншого, вимірюється в секундах, і експерименти показують, що час, який витрачається на передачу файлу після застосування запропонованої технології, значно менший порівняно з передачею файлу такого ж початкового розміру.

Висновки. При роботі No-SQL баз даних постійно виникає дублювання, і якщо не вирішувати цю проблему, то це може призвести до неефективного використання дискового простору та мережевих ресурсів. Запропонована технологія забезпечує ефективне вирішення цієї проблеми, використовуючи структурну інформацію для зменшення обсягу цих даних за рахунок дедуплікації і стиснення. Використовуючи комбінацію дедуплікації та стиснення пропонується дворівневий підхід до оптимізації зберігання даних, який легко інтегрується з існуючими інструментами резервного копіювання, надаючи організаціям простий спосіб підвищити ефективність зберігання даних без необхідності суттєвої перебудови інфраструктури управління даними.

Хоча поточна реалізація зосереджена на текстових даних, існує значний потенціал для використання цих методів на ширший спектр типів даних. Наприклад, застосування дедуплікації та стиснення до мультимедійних файлів, таких як зображення, відео та аудіо, або до потоків даних у реальному часі може ще більше підвищити економію місця на сховищах. Такі розширення можуть бути цінними в галузях, які обробляють величезні обсяги таких даних, зокрема в медіа, телекомунікаціях та додатках Інтернету речей. Крім того, застосування цих методів в середовищах реального часу, де дані повинні оброблятися і передаватися безперервно, може запропонувати значні переваги з точки зору ефективності зберігання і обробки.

У майбутньому планується дослідити аналітичні інструменти, такі як *rig*, *hive* та інші, для прогнозування розміру, структури та закономірностей даних. Ці прогнози можуть дозволити більш цілеспрямовано застосовувати методи дедуплікації та стиснення. Це підвищить ефективність зберігання за рахунок оптимізації того, коли і де ці методи використовуються. За наявності прогностичних моделей запропонована технологія може перетворитися на повноцінну динамічну систему, здатну коригувати свої стратегії дедуплікації та стиснення на основі аналізу вхідних даних у реальному часі.

Запропонована технологія є кроком вперед у підвищенні ефективності зберігання баз даних NoSQL. Поєднання дедуплікації та стиснення пропонує гнучке, масштабоване рішення, яке може адаптуватися до зростаючих потреб сучасних індустрій, керованих даними. Так як обсяги даних продовжують зростати, а вимоги до їх зберігання стають все більш вираженими, то фреймворки, які використовують нові технології оптимізації збереження даних, будуть відігравати важливу роль в управлінні ландшафтом даних, гарантуючи, що організації зможуть зберігати і передавати свої дані в економічно ефективний, результативний спосіб.

Список використаних джерел:

1. Roy-Hubara N., Sturm A. Design methods for the new database era: A systematic literature review. *Software and Systems Modeling*, 2019. № 19, pp. 297–312. doi:10.1007/s10270-019-00739-8.
2. Ramzan S., Bajwa I. S., Kazmi R., Amna. Challenges in NoSQL-based distributed data storage: A systematic literature review. *Electronics*, 2019. № 8, pp. 1–29. doi:10.3390/electronics8050488.
3. Kim W., Lee I. Survey on data deduplication in cloud storage environments. *Journal of Information Processing Systems*, 2021. № 17(3), pp. 658–673. doi:10.3745/JIPS.03.0160.
4. Kumar N., Shobha, Jain S. C. efficient data deduplication for big data storage systems. In *Progress in Advanced Computing and Intelligent Engineering*. 2019. № 714, pp. 351–371. 10.1007/978-981-13-0224-4_32
5. Wang C., Fu Y., Yan J., Wu X., Zhang Y., Xia H., Yuan Y. A cost-efficient resemblance detection scheme for post-deduplication delta compression in backup systems. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*. 2022. № 34(3), pp. e6558. doi:10.1002/cpe.6558.
6. Zhang D., Le J., Mu N., Wu J., Liao X. Secure and Efficient data deduplication in JointCloud storage. *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2023. № 11(1), pp. 156–167. doi: 10.1109/TCC.2021.3081702.
7. Tan H., Zou X., Wan B., Gu Z., Xia W. SuperDelta: Multiple referenced base chunks scheme for fine-grained deduplication backup storage system. *Data Compression Conference Proceedings*. 2024. pp. 362–371. doi:10.1109/DCC58796.2024.00044.
8. Ge X., Zhou C. A data allocation strategy for deduplication backup systems in disk arrays. *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering*. 2024. pp. 1325004. doi:10.1117/12.3038451
9. Zhang D., Deng Y., Zhou Y., Li J., Zhu W., Min G. MGRM: A multi-segment greedy rewriting method to alleviate data fragmentation in deduplication-based cloud backup systems. *IEEE Transactions on Cloud Computing*. 2023. № 11(3), pp. 2503–2516. doi:10.1109/TCC.2022.3214816
10. Koushik C. S. N., Choubey S. B., Choubey A., Sinha G. R. Data deduplication for cloud storage. In *Data Deduplication Approaches*. 2021. pp. 307–317. doi:10.1016/b978-0-12-823395-5.00010-0.

УДК 004.89
DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.3.3>

Serhii KOLOMOIETS

Graduate Student, Assistant at the Department of Information Systems and Technologies, Faculty of Informatics and Computer Engineering, National Technical University of Ukraine «Ihor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», serhii.o.kolomoiets@ukr.net
ORCID: 0000-0003-3741-4517

APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN MEDICAL IMAGE RECOGNITION

Abstract. The article is devoted to the study of image recognition in medicine using deep learning. The use of deep learning allows automating image processing and analysis, which significantly reduces the human factor and increases the accuracy of diagnoses. Artificial intelligence, in particular deep learning, is actively used to recognize abnormalities in X-rays, ultrasound images, MRI, and CT scans, so this technology is actively developing in the areas of oncology and cardiology. The algorithms can learn from large amounts of data, which allows them to identify patterns that may be unnoticed or unclear to human observation, which is made possible by convolutional layers that use filters to detect local features in images.

The purpose of the publication is to study the current state of the art of medical image recognition and summarize the latest research in this area.

Methodology. The article reviews and analyzes the literature on the use of deep learning, its advantages, disadvantages and limitations relative to traditional methods in image recognition, considers the necessary steps for building image recognition systems, and proves the importance of convolutional neural networks (CNNs).

Conclusions. Although medical image recognition is not the most popular area of application of convolutional neural networks today, it is very important for providing more effective treatment to the population. The most researched and relevant areas in medicine are lungs, heart, breast, liver, histology, and eyes. Modern publications of scientists have proven the high accuracy of convolutional neural networks in diagnosing diseases. However, some indicators can still be significantly improved, which gives room for further research. Convolutional neural networks have demonstrated high accuracy in recognizing patterns in medical images, which can contribute to early diagnosis of diseases in the above-mentioned medical fields. In addition, the use of CNNs will help automate processes, which will reduce the workload of medical staff for more complex cases; increase the efficiency of processing large amounts of data; and reduce the number of erroneous image interpretations. Today, convolutional neural networks can be called an assistant for medical staff, but a lot of research and investment is still needed for their widespread use by doctors, but if these conditions are met, their potential is worth further research.

Key words: artificial intelligence, convolutional neural networks, diagnostic systems, generative adversarial networks, image recognition.

Сергій КОЛОМОЄЦЬ. ЗАСТОСУВАННЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В РОЗПІЗНАВАННІ МЕДИЧНИХ ЗОБРАЖЕНЬ

Анотація. Стаття присвячена дослідженню розпізнавання зображень в медицині за допомогою глибокого навчання. Застосування глибокого навчання дозволяє автоматизувати процеси обробки та аналізу зображень, що значно зменшує людський фактор і підвищує точність діагнозів. Штучний інтелект, зокрема глибоке навчання, активно використовується для розпізнавання аномалій на рентгенівських знімках, ультразвукових зображень, МРТ та КТ, тому дана технологія активно розвивається в напрямках онкології та кардіології. Алгоритми можуть навчатися на великих обсягах даних, що дозволяє їм ідентифікувати закономірності, які можуть бути непоміченими або незрозумілими для людського спостереження, це є можливим завдяки згортковим шарам, які використовують фільтри для виявлення локальних ознак у зображеннях.

Метою публікації є дослідження сучасного стану питання розпізнавань медичних зображень та узагальнення новітніх досліджень у цій сфері.

Методологія. У статті проведений огляд та аналіз літератури щодо застосування глибокого навчання, його переваг, недоліків та обмежень відносно традиційних методів в розпізнаванні зображень, розглянуті необхідні кроки для побудови систем розпізнавання зображень, доведено важливість згорткових нейронних мереж (ЗНМ).

Висновки. Хоча розпізнавання медичних зображень не є найпопулярнішою сферою застосування згорткових нейронних мереж сьогодні, вона дуже важлива для забезпечення більш ефективного лікування населення. Найбільш дослідженими та актуальними областями в медицині є легені, серце, молочна залоза, печінка, гістологія та очі. Сучасні публікації вчених довели високу точність згорткових нейронних мереж у діагностиці захворювань. Однак деякі показники ще можна значно покращити, що дає простір для подальших досліджень. Згорткові нейронні мережі продемонстрували високу точність розпізнавання патернів на медичних зображеннях, що може сприяти ранній діагностиці захворювань у вищезгаданих галузях медицини. Крім того, використання CNN допоможе автоматизувати процеси, що зменшить навантаження на медичний персонал для більш складних випадків; підвищить ефективність обробки великих обсягів даних; зменшить кількість помилкових інтерпретацій зображень. На сьогоднішній день згорткові нейронні мережі можна назвати помічником для медичного персоналу, але для їх широкого використання лікарями потрібно ще багато досліджень та інвестицій, але якщо ці умови будуть виконані, то їх потенціал вартий подальших досліджень.

Ключові слова: штучний інтелект, згорткові нейронні мережі, діагностичні системи, генеративні змагальні мережі, розпізнавання зображень.

Introduction. Today, the task of image recognition, image creation, reconstruction, and enhancement is becoming increasingly popular in the world. Recognizing the faces of people who have committed an offense, recognizing cars that have exceeded the speed limit, analyzing medical images for diagnosing diseases, generating DALL-E images from OpenAI, and enhancing old photos in digital quality – all of this has become possible thanks to artificial intelligence, deep learning, convolutional neural networks, and generative adversarial networks.

The task of pattern recognition is to distribute the initial data into a certain class that characterizes this data by essential features from the total mass of less essential features, and it is one of the main issues of the theory of intelligent systems [1]. Intelligent information systems are a type of automated information systems; they support human activity in the search for information in the mode of extended natural language dialogue [4]. The main task of intelligent systems is to provide answers given rules and data, which is the opposite of machine learning (it has to give rules given data and knowing the answers). Deep learning is a subset of machine learning, which in turn is a subset of artificial intelligence (Figure 1).

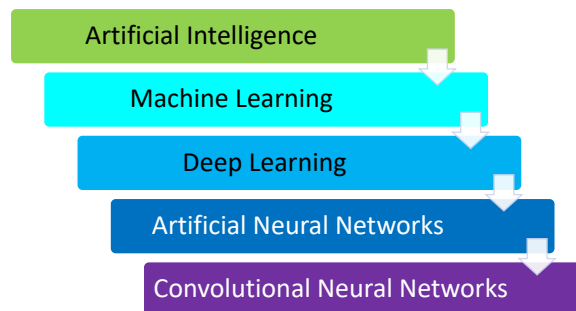


Fig. 1. Artificial intelligence hierarchy

Convolutional neural networks (CNN) get their name from the process of edge detection, from smaller local image features to more general ones, and are mathematically described by the formula (1) (convolution operation in two-dimensional space) [2].

$$f[x, y] * g[x, y] = \sum_{n_1=-\infty}^{\infty} \sum_{n_2=-\infty}^{\infty} f[n_1, n_2] * g[x - n_1, y - n_2] \quad (1)$$

Types of convolutional neural networks [13]:

- Conventional – consist of a series of convolutional and sub-sampling layers followed by one or more fully connected layers. Each convolutional layer in such a network performs convolutions using learning filters to extract features from the input image.
- Recurrent Neural Networks (RNNs) can process sequential data based on the context of previous values. Unlike conventional neural networks, which process data in a fixed order, RNNs can work with variable length inputs and draw conclusions that depend on previous inputs.
- Fully Convolutional Networks (FCN) – widely used in computer vision tasks such as image segmentation, object detection, and image classification. They are trained from start to finish using the backpropagation method to categorize or segment images.
- Spatial Transformer Network (STN) – used in computer vision tasks to improve the ability of a neural network to recognize objects or patterns in an image regardless of location, orientation, or scale.

There are 3 types of CNNs depending on the types of tasks they solve [2]:

1. 1D – used for signal processing when it is necessary to detect changes in the signal;
2. 2D

- Image classification – identifies key features of images and determines their class;
- Image recognition;
- Image segmentation (allows you to determine which segment each pixel belongs to);

3. 3D – video classification.

In order to recognize an image, there is a certain algorithm – it is necessary to select the most important initial data for a certain class that characterize them [3]:

1. Image perception – obtaining values of the characteristic properties of the object;
2. Pre-processing – removing noise, presenting the image in black and white, cropping unnecessary parts of the image;
3. Characteristic extraction (indexing) – characteristic properties of the object are measured;
4. Classification – decision making.

Consider the advantages and disadvantages of convolutional neural networks [15].

The advantages are as follows:

- fewer parameters to be adjusted;
- higher resistance to changes in the position of the image being processed;
- are good at solving image classification and recognition tasks;
- availability of ready-made settings for popular tasks.

The disadvantages are as follows:

- neuron activation functions;
- network training speed;
- the dimension of the convolutional matrix;
- number of convolutional layers.

Problem statement

Despite the fact that today’s trends in the use of convolutional neural networks are focused on image and video generation, this article will consider their application in medicine due to the importance of this field and the large number of challenges it faces.

According to recent literature reviews, the most researches and publications on image recognition in various medical fields are in the areas shown in Figure 2 [10].

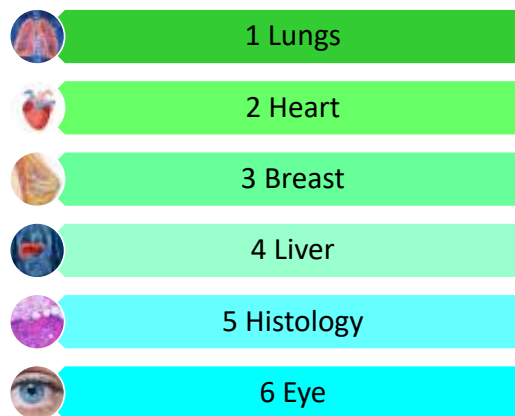


Fig. 2. Amount of publications by medical fields in image recognition

Consider in more detail each of the CNN application areas.

Lungs. As a result of the COVID-19 pandemic, the lungs have attracted the most attention, due to the large number of computed tomography (CT) data sets and the urgency due to the high prevalence of the disease (Figure 3). The lungs also attract considerable attention because of the poor diagnosis of lung cancer, which is usually diagnosed in the last stages, leading to high mortality from this disease [7, 8]. Due to the accurate segmentation of lung fields, it is possible to detect the disease in time before the onset of irreversible processes [12].

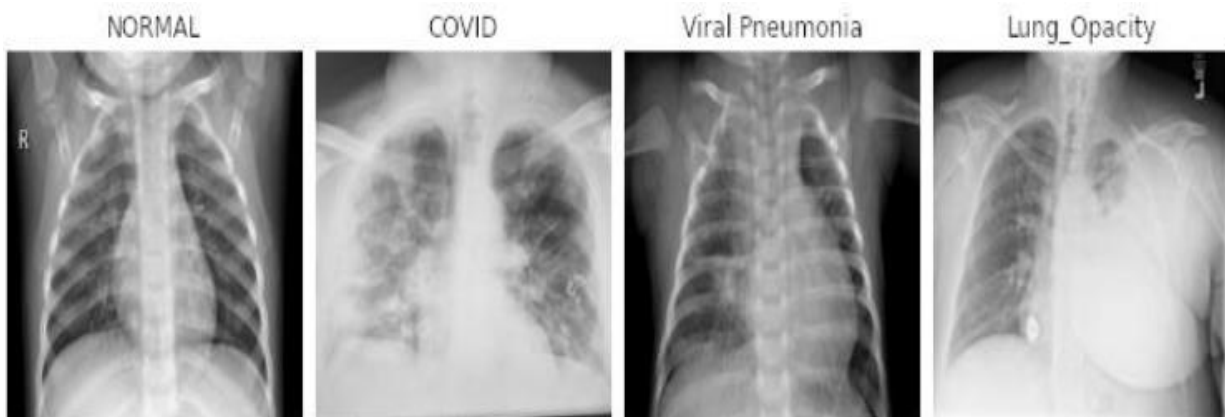


Fig. 3. An example of CNN recognition of CT images

Cardiovascular diseases. Arrhythmia classification, detection of abnormalities in ECG images, prediction of heart disease based on image classification, early detection of cardiovascular diseases in patients are the main issues that can be solved by convolutional neural networks in cardiology [5].

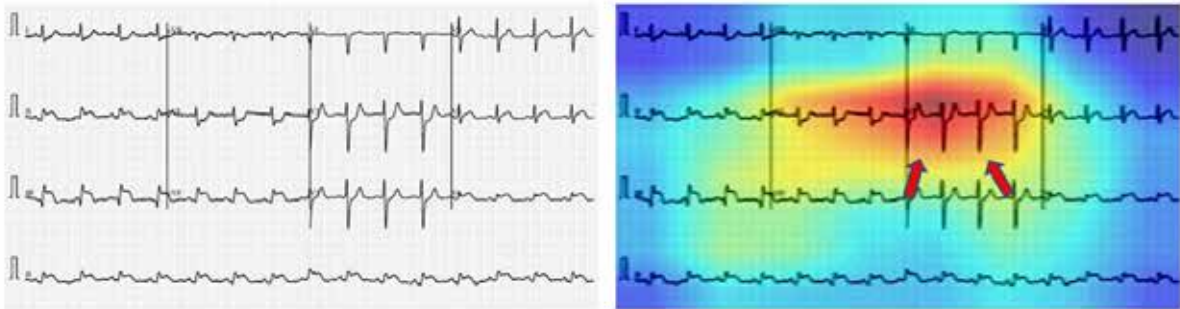


Fig. 4. An example of detecting myocardial infarction using convolutional neural networks on an ECG

Breast. Breast cancer is the second most common type of cancer, so diagnosing it at an early stage or detecting the likelihood of the disease is very important. Single-slice digital breast tomosynthesis (SSCT) classification and deep learning improve breast cancer screening by eliminating the limitations of traditional mammography, such as tissue overlap, which allows for higher diagnostic accuracy and a reduction in false-positive/negative results [6]. Analyzing the morphological shape and thickness of the skin to detect asymmetry in mammography images indicates potential breast cancer by assessing the similarity between a patient's two breasts by analyzing the distances from the breast image centroid to its perimeter; taking into account possible geometric distortions, and identifying skin-related asymmetries by expanding the set of skin pixels based on similarity in intensity and depth. This makes it possible to detect breast cancer at early stages and sometimes prevent the disease.

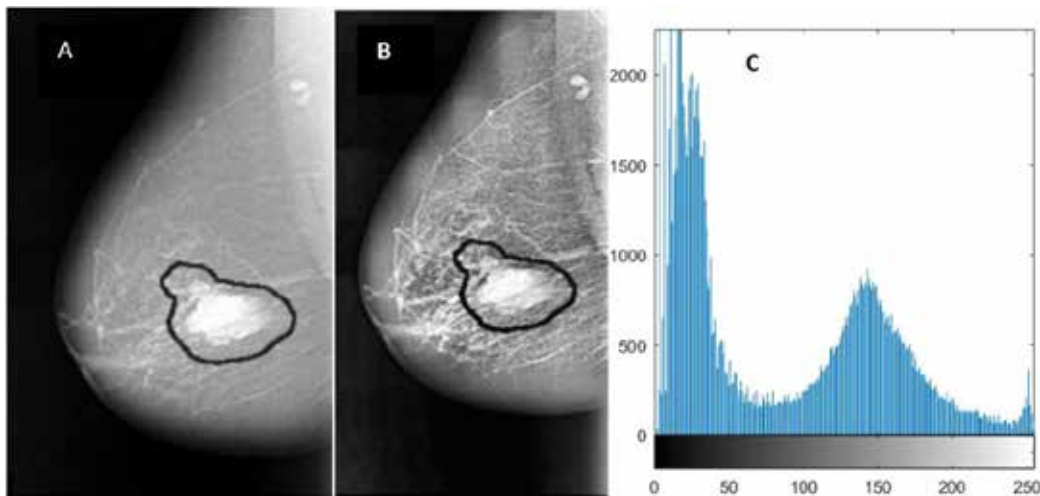


Fig. 5. An example of breast cancer detection using convolutional neural networks

Liver. Liver cancer, non-alcoholic fatty liver disease, and cirrhosis are a significant problem because the disease is often asymptomatic, making screening and early detection critical for a good prognosis. Convolutional neural networks can be used to segment liver lesions in CT images. Today, machine learning is actively used to accelerate repetitive tasks (segmentation, obtaining information about the volume of the lesion, tumor, improving image quality, reducing scanning time and optimizing image acquisition) [11].

Eye. Early detection and intervention can help to analyze the retina to diagnose diabetic retinopathy, which is the leading cause of blindness in the world, and can also detect age-related molecular degeneration and glaucoma [14].

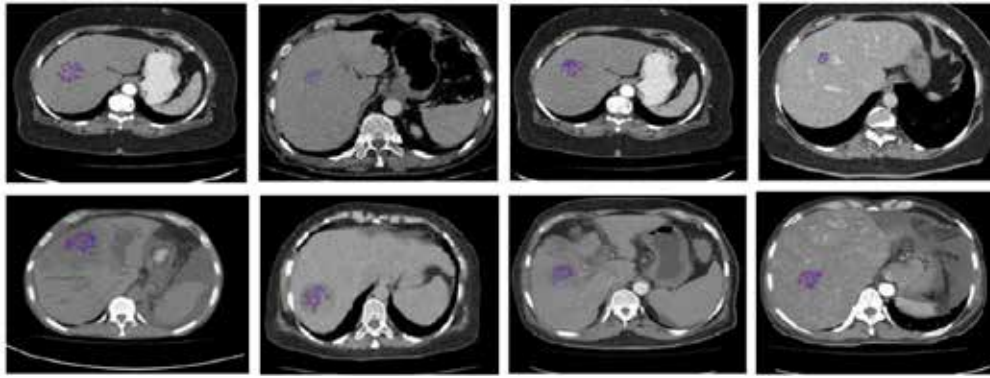


Fig. 6. An example of liver cirrhosis detection using convolutional neural networks

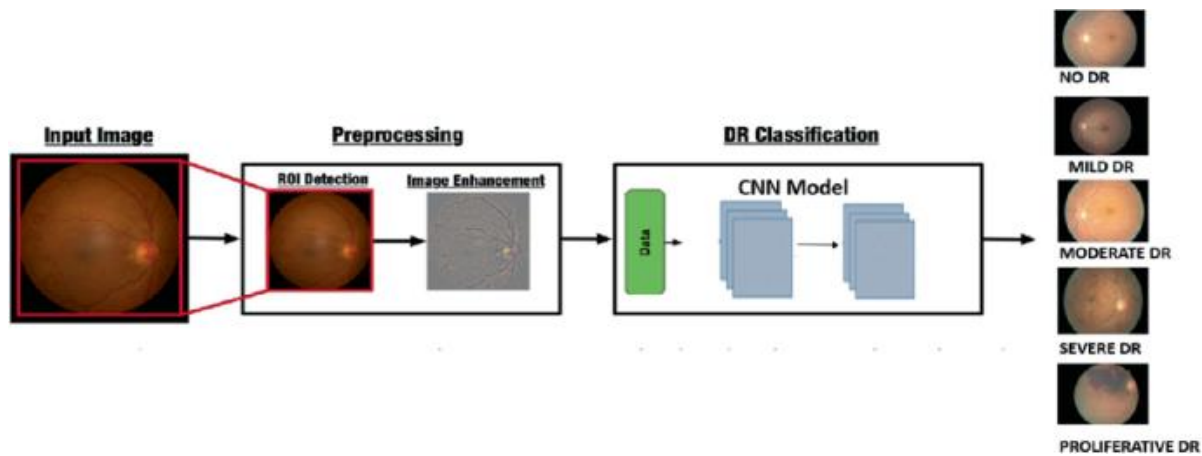


Fig. 7. An example of diabetic eye disease detection using convolutional neural networks

Table 1

Accuracy of convolutional neural networks depending on the disease

Nº	Localization of the disease in the organ	Diagnostic method	Accuracy (%)
1	Breast	Digital breast tomosynthesis	≈ 93
2	Brest	MRI	≈ 65
3	Brain	CTA	≈ 74
4	Brain	MRI	≈ 90
5	Eye	Retinal camera	100
6	Liver	MRI	≈ 85
7	Liver	CTI	≈ 76

Source: based on [9]

Conclusions

Although medical image recognition is not the most popular use case for convolutional neural networks today, it is very important for providing more effective treatment to the population.

The most researched and relevant areas in medicine are lungs, heart, breast, liver, histology, and eyes. Modern publications by scientists have proven the high accuracy of convolutional neural networks in diagnosing diseases. However, some indicators can still be significantly improved, which gives room for further research.

Convolutional neural networks have demonstrated high accuracy in recognizing patterns in medical images, which can contribute to the early diagnosis of diseases in the above-mentioned areas of medicine. In addition, the use of CNNs will help automate processes, which will reduce the burden on medical staff for more complex cases; improve efficiency in processing large amounts of data; and reduce the number of misinterpretations of images.

As of today, convolutional neural networks can be called an assistant for medical staff, but a lot of research and investment is still needed to make it widely used by doctors, but if these conditions are met, their potential is worth further research.

Bibliography:

1. Копча-Горячкіна Г. Е. Теорія розпізнавання образів. URL: <https://org2.knuba.edu.ua/mod/resource/view.php?id=18848>
2. Малишев О. Використовуємо CNN для обробки зображень. Частина 1. URL: <https://dou.ua/forums/topic/48368/>
3. Творошенко І. С. Цифрова обробка зображень. 2015 URL: <http://surl.li/fusflj>
4. Ушакова І. О. Інформаційні системи та технології на підприємстві. URL: <http://surl.li/plkgkg>
5. Ansari Y, Mourad O, Qaraqe K and Serpedin E. Deep learning for ECG Arrhythmia detection and classification: an overview of progress for period 2017–2023. *Front. Physiol.* 2023, 14:1246746. URL: <https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1246746>
6. Danala G, Maryada S. K., Islam W, Faiz, R., Jones M., Qiu Y, Zheng B. A. Comparison of Computer-Aided Diagnosis Schemes Optimized Using Radiomics and Deep Transfer Learning Methods. *Bioengineering* 2022, 9, 256. URL: <https://www.mdpi.com/2306-5354/9/6/256>
7. Forte G. C., Altmayer, S., Silva R. F., Stefani M. T.; Libermann L. L., Cavion C. C., Youssef A., Forghani R., King J., Mohamed T.-L., et al. Deep Learning Algorithms for Diagnosis of Lung Cancer: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cancers* 2022, 14, 3856. URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36010850/>
8. Hunger T, Wanka-Pail E., Brix G., Griebel J. Lung Cancer Screening with Low-Dose CT in Smokers: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Diagnostics* 2021, 11, 1040. URL: <https://www.mdpi.com/2075-4418/11/6/1040>
9. Obuchowicz R., Strzelecki M., Piórkowski A. Clinical Applications of Artificial Intelligence in Medical Imaging and Image Processing—A Review. *Cancers* 2024, 16, 1870. URL: <https://doi.org/10.3390/cancers16101870>
10. Pinto-Coelho L. How Artificial Intelligence Is Shaping Medical Imaging Technology: A Survey of Innovations and Applications. *Bioengineering* 2023, 10, 1435. URL: <https://doi.org/10.3390/bioengineering10121435>
11. Popescu D., Stanciulescu A., Pomohaci M.D., Ichim L. Decision Support System for Liver Lesion Segmentation Based on Advanced Convolutional Neural Network Architectures. *Bioengineering* 2022, 9, 467. URL: <https://www.mdpi.com/2306-5354/9/9/467>
12. Rahman T, Dr. Chowdhury M., Khandakar A., COVID-19 Radiography Data-base, Kaggle, 2021. URL: <https://www.kaggle.com/tawsifurrahman/covid19-radiography-database>.
13. Reza Keyvanpour M., Barani Shirzad M., Application of Machine Learning in Agriculture, 2022 URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/computer-science/convolutional-layer>
14. Sheng B., Chen X., Li T., Ma T., Yang Y., Bi L., Zhang X. An Overview of Artificial Intelligence in Diabetic Retinopathy and Other Ocular Diseases. *Front. Public Health* 2022, 10, 971943. URL: <https://doi.org/10.3389/fpubh.2022.971943>
15. Thiele F, Windebank A. J., Siddiqui A.M. Motivation for using data-driven algorithms in research: A review of machine learning solutions for image analysis of micrographs in neuroscience. *Journal of Neuropathology & Experimental Neurology*, 2023, 1–16. URL: <https://doi.org/10.1093/jnen/nlad040>

УДК 519.6:504.064

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.3.4>

Олександр ПОПОВ

член-кореспондент НАН України, доктор технічних наук, професор, виконувач обов'язків директора, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики

Національної академії наук України,

професор кафедри комп'ютерних інформаційних систем і технологій, ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія Управління персоналом», sasha.popov1982@gmail.com

ORCID: 0000-0002-5065-3822

Андрій ЯЦИШИН

доктор технічних наук, старший науковий співробітник, виконувач обов'язків завідувача відділу, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики

Національної академії наук України,

провідний науковий співробітник, Інститут проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова Національної академії наук України, iatsyshyn.andriy@gmail.com

ORCID: 0000-0001-5508-7017

Анастасія ЛАГОЙКО

провідний інженер, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики

Національної академії наук України, lagoyko992@gmail.com

ORCID: 0000-0001-6366-4419

Володимир КУЦЕНКО

молодший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, kuts.vo@gmail.com

ORCID: 0000-0002-0577-2056

Олександр КОВАЛЕНКО

молодший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України,

аспірант, ПрАТ «ВНЗ «Міжрегіональна Академія Управління персоналом», whitewavex@gmail.com

ORCID: 0000-0003-4798-7722

Євген КРАСНОВ

молодший науковий співробітник, Центр інформаційно-аналітичного та технічного забезпечення моніторингу об'єктів атомної енергетики Національної академії наук України, yevhen.krasnov@gmail.com

ORCID: 0009-0009-7971-0761

**СУЧАСНІ ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЕФЕКТУ «ЗМИВУ» ПРИ ВИМІРЮВАННІ
КОНЦЕНТРАЦІЙ ЗАБРУДНЮЮЧИХ РЕЧОВИН ЗА ДОПОМОГОЮ БПЛА**

Анотація. Рівень забруднення атмосферного повітря формується під впливом багатьох факторів, зокрема викидів від об'єктів енергетики, транспорту, промисловості сільськогосподарства, а також процесів утилізації та очищення стоків. Він також залежить від метеорологічних умов, швидкості розсіювання забруднюючих речовин та їх взаємодії з навколишнім середовищем (фізико-хімічна трансформація, вимивання опадами, поглинання підстилаючою поверхнею), і географічних особливостей місцевості (рельєф, наявність забудови, висота та щільність рослинності). У статті наведено джерела викидів таких забруднювачів повітря, як тверді частинки, чадний газ і діоксид вуглецю, оксиди азоту, аміак, летючі органічні сполуки, озон, діоксид сірки, сірководень, випромінювання, запахи), зазначено загальні методи їх вимірювання. Описано особливості функціонування наземних стаціонарних станцій моніторингу якості повітря. Показано низьку ефективність даних систем для оперативного реагування на швидкоплинні надзвичайні ситуації з хімічним та радіаційним фактором забруднення. Обґрунтовано, що для оперативної оцінки обстановки та отримання необхідних даних під час виникнення таких ситуацій ефективним підходом є застосування систем моніторингу, які базуються на мобільних платформах, а саме БПЛА. Відзначено, що перевагами цих засобів є можливість оперативного потрапляння на місце надзвичайної ситуації в складних умовах (складний рельєф місцевості, наявність важкопрохідної рослинності, руйнація або аварійно-небезпечний стан об'єкту, велика пожежа або вибухи на території об'єкту, бойові дії, важкі метеумови тощо) та швидке отримання необхідних даних для прийняття вчасних ефективних управлінських рішень службами реагування. Описано ефект «змиву», який виникає під БПЛА в результаті швидкого обертання його роторів, що спричиняє порушення розподілу повітря навколо дрона і зменшення концентрації досліджуваних газів в місці розташування мультисенсорної сис-

теми. Здійснено аналіз сучасних передових технічних рішень науковців з різних країн світу щодо розміщення датчиків на борту БПЛА для зменшення впливу ефекту «змиву» на точність вимірювання відповідних концентрацій.

Ключові слова: моніторинг атмосферного повітря, БПЛА, ефект «змиву», технічні рішення.

Oleksandr POPOV, Andrii IATSYSHYN, Anastasiia LAHOIKO, Volodymyr KUTSENKO, Oleksandr KOVALENKO, Yevhen KRASNOV. MODERN TECHNICAL SOLUTIONS TO REDUCE THE «DOWN-WASH» EFFECT WHEN MEASURING POLLUTANT CONCENTRATIONS USING UAVS

Abstract. The level of air pollution is formed under the influence of many factors, including emissions from energy, transport, and agricultural facilities, as well as waste disposal and treatment processes. It also depends on meteorological conditions, the rate of dispersion of pollutants and their interaction with the environment (physical and chemical transformation, leaching by precipitation, absorption by the underlying surface), and geographical features of the area (relief, presence of buildings, height and density of vegetation). The article describes the sources of emissions of such air pollutants as particulate matter, carbon monoxide and carbon dioxide, nitrogen oxides, ammonia, volatile organic compounds, ozone, sulphur dioxide, hydrogen sulphide, radiation, and odours, and outlines the general methods of their measurement. The peculiarities of the functioning of ground-based stationary air quality monitoring stations are described. The article shows the low efficiency of these systems for rapid response to rapidly evolving emergencies with chemical and radiation pollution. It is substantiated that an effective approach to the rapid assessment of the situation and obtaining the necessary data in the event of such situations is to use monitoring systems based on mobile platforms, namely UAVs. It is noted that the advantages of these tools are the ability to quickly get to the scene of an emergency in difficult conditions (difficult terrain, the presence of hard-to-pass vegetation, destruction or emergency condition of an object, a large fire or explosions on the territory of an object, hostilities, severe weather conditions, etc.) and to quickly obtain the necessary data for making timely and effective management decisions by response services. The article describes the «down-wash» effect that occurs under the UAV as a result of the rapid rotation of its rotors, which causes a disturbance in the air distribution around the drone and a decrease in the concentration of the gases under study at the location of the multisensor system. The article analyses the modern advanced technical solutions of scientists from around the world regarding the placement of sensors on board the UAV to reduce the impact of the «down-wash» effect on the accuracy of measuring the relevant concentrations.

Key words: atmospheric air monitoring, UAVs, down-wash effect, technical solutions.

Актуальність проблеми

На сьогоднішній день основними антропогенними причинами надходження забруднюючих речовин в атмосферне повітря є викиди підприємств, діяльність яких пов'язана з видобутком природних ресурсів (урану, вугілля, нафти, природного газу тощо), об'єктів промисловості (енергетика, металургія, сільське господарство, харчова, хімічна, фармацевтична), транспорту (вихлопні гази, кіптява, пил), від спалювання відходів тощо. Виверження вулканів, гейзери, лісові та торф'яні пожежі, піщані бурі, випаровування боліт є потужними природними джерелами забруднення атмосфери різноманітними газами, твердими частинками та аерозолями [1]. В таблиці 1 представлено основні забруднювачі повітря, їх джерела та загальні методи вимірювання.

Таблиця 1

Забруднювачі повітря, їх джерела та загальні методи вимірювання

Забруднювач	Опис	Джерела	Еталонний метод вимірювання
Тверді частинки (PM ₁₀ , PM _{2,5} , PM ₁)	Дрібний пил, який складається з найдрібніших частинок, які розділені на групи в залежності від фракцій: PM ₁₀ (<10 мкм), PM _{2,5} (<2,5 мкм), PM ₁ (<1,0 мкм)	Антропогенні: утворюється при спалюванні палива в різних секторах, включаючи транспорт, енергетику, побут, промисловість та сільське господарство. Природні: пилові бурі, лісові та торф'яні пожежі, виверження вулканів.	Гравіметричні методи, фотодетектори
Чадний газ (CO) і діоксид вуглецю (CO ₂)	Гази, що утворюються при спалюванні палива	Антропогенні: двигуни транспортних засобів, спалювання відходів. Природні: лісові та торф'яні пожежі, виверження вулканів, рослинність та інша біомаса, що розкладаються.	Недисперсійні інфрачервоні методи
Оксиди азоту (NO _x)	Група реакційноздатних газів, включаючи NO і NO ₂ .	Антропогенні: двигуни транспортних засобів, спалювання деревини та промислова діяльність (виробництво механічної енергії та електроенергії). Природні: біологічні процеси в ґрунті, блискавка	Хемілюмінесценція

Аміак (NH ₃)	Безбарвний газ з різким запахом	Антропогенні: сільськогосподарська діяльність	Хемілюмінесценція
Летючі органічні сполуки	Хімічні речовини, що містять вуглець, які випаровуються при кімнатній температурі	Антропогенні: транспорт, майже всі галузі промисловості, спалювання деревини в житлових приміщеннях, споживчі товари (розчинники, фарби, засоби для чищення), відходи та стічні води. Природні: дихання рослин і тварин, розкладання органічних речовин.	Газова хроматографія з фотоіонізаційними та фотометричними детекторами
Озон (O ₃)	Газ, що складається з трьох атомів кисню	Антропогенні: реакції між NO _x і леткими органічними сполуками (каталізуються сонячним світлом)	УФ фотометрія.
Діоксид сірки (SO ₂)	Безбарвний газ з різким запахом	Антропогенні: морські судна, нафтопереробка, дизельні двигуни. Природні: виверження вулканів, розкладання органічної речовини, морські бризки.	УФ-флуоресценція
Сірководень (H ₂ S).	Безбарвний газ із характерним запахом тухлих яєць	Антропогенні: видобуток і переробка нафти та природного газу, розкладання відходів людини та тварин, очисні споруди та звалища. Природні: вулкани, гарячі джерела та підводні термальні джерела, болота.	Газова хроматографія з фотометричними детекторами
Іонізуюче випромінювання	Випромінювання частинок високої енергії, які викликають іонізацію	Антропогенні: ядерні аварії, ядерні вибухи, видобуток урану. Природні: радіоактивний розпад радіонуклідів.	Лічильник Гейгера-Мюллера та сцинтиляційні лічильники
Інші сполуки, що створюють запах	Леткі сполуки, запах яких люди і тварини сприймають за допомогою нюху	Антропогенні: сільське господарство та тваринництво, промислова діяльність (харчова, хімічна, фармацевтична), відходи та очищення стічних вод	Динамічна ольфактометрія

У багатьох країнах рівень забруднення повітря з часом вимірюється за допомогою наземних стаціонарних станцій моніторингу якості повітря. Моніторинг у галузі охорони атмосферного повітря проводиться з метою отримання, збирання, оброблення, збереження та аналізу інформації про викиди забруднюючих речовин та рівень забруднення атмосферного повітря, оцінки та прогнозування його змін і ступеня небезпечності та розроблення науково обґрунтованих рекомендацій для прийняття рішень у галузі охорони атмосферного повітря [2]. Проте такі системи мають ряд недоліків, а саме: моніторинг здійснюється в заданій точці вимірювання, що представляє джерело викидів або фон для даного регіону, тому таке вимірювання не має просторових характеристик, наприклад, у рамках аналізу мінливості концентрації разом із висотою; у разі виникнення надзвичайної ситуації (НС) неможливо потрапити на її місце під час складних умов (складний рельєф місцевості; наявність важкопрохідної рослинності; руйнація, аварійно-небезпечний стан або замінування об'єкту; велика пожежа або вибухи на території об'єкту; важкі погодні умови тощо); необхідність фізичної участі персоналу у відборі проб, що створює суттєвий ризик для його життя та здоров'я в умовах значного рівня забруднення на досліджуваній території; часозатратна логістика; людський фактор поведінки при НС. Також низький рівень технічного забезпечення систем моніторингу не дає можливості отримувати інформацію щодо розвитку таких НС в режимі реального часу з можливістю візуального спостереження. Такий стан систем моніторингу не дає можливості відповідним службам реагування отримувати максимально швидко оперативну повну інформацію щодо виникнення та розвитку НС (різновид НС (пожежа, вибух, витікання небезпечних речовин, розрив трубопроводу, тощо), розподіл в просторі та часі рівня забруднення, його склад, швидкість розповсюдження, місце локалізації НС, прогнозовані масштаби ураження, ризики для життя та здоров'я персоналу і населення та ін.), що є абсолютно неприйнятним з точки зору забезпечення національної безпеки будь якої країни [3].

Ці недоліки можна вирішити застосувавши системи моніторингу, які базуються на мобільних платформах, а саме безпілотні літальні апарати (БПЛА). Сучасні наукові дослідження показують, що завдяки стрімкому розвитку сектору виробництва дронів, а також у сфері конструювання портативних детекторів зростає застосування БПЛА для моніторингу забруднення атмосфери. Проте через обмежену вантажопідйомність малих БПЛА та обмежений час їх польоту потрібні легкі та енергоефективні системи

для здійснення моніторингу навколишнього середовища за допомогою безпілотників. На сьогоднішній день для цієї мети успішно використовують недорогі одиничні газові датчики, мультисенсорні системи, електронні носи, високоточні оптичні аналізатори, детектори радіації та оптичні лічильники частинок для концентрації твердих часток [1]. Проте при використанні безпілотників з гвинтокрилом виникає явище «змиву» (downwash), що спричиняє порушення розподілу повітря навколо дрона, і, таким чином, впливає на продуктивність бортових датчиків.

Метою статті є визначення підходів та сучасних технічних рішень щодо розміщення аналітичних засобів на корпусі БПЛА для зменшення/усунення ефекту «змиву».

Виклад основного матеріалу

Основні групи БПЛА

Можна виділити дві основні групи БПЛА: безпілотні літальні апарати з нерухомим крилом (НК) і безпілотники з гвинтокрилом (БГ). Залежно від кількості роторів БГ можна далі розділити на однороторні апарати, трикоптери, квадрокоптери, гексакоптери та октокоптери [4]. Однак для моніторингу забруднення атмосфери, як правило, кращими є невеликі транспортні засоби з чотирма або шістьма роторами [5]. Цікавим рішенням є поєднання принципу побудови НК та БГ. Гібридний підхід поєднує в собі переваги обох систем, наприклад вертикальний зліт і посадка з високошвидкісним польотом, характерним для НК та БГ апаратів [6, 7].

Безпілотники НК можуть літати на високих швидкостях і, отже, охоплювати великі території протягом одного польоту. Основним обмеженням цих транспортних засобів є низька вантажопідйомність. Їм також потрібна система запуску або злітно-посадкова смуга для зльоту та посадки. Оскільки вони рухаються відносно швидко, просторова роздільна здатність досягнутих вимірювань зазвичай низька [5]. Однак цей фактор також залежить від часу відгуку бортового аналітичного обладнання. З тієї ж причини їх не можна використовувати для додатків, які вимагають польотів на повільній швидкості, таких як дослідження міських і промислових районів.

Безпілотники БГ позбавлені цих обмежень, тому що вони працюють на нижчих швидкостях і ними легко маневрувати, частково завдяки їхнім можливостям вертикального зльоту і посадки [8]. Однак через низьку швидкість і дальність польоту дослідження великих територій зазвичай вимагають декількох польотів, що займає багато часу та потребує більших фінансових витрат. Час польоту типового БПЛА з ротаційним крилом становить лише близько 30 хвилин і може бути зменшений при повному завантаженні [9].

Ефект «змиву» та шляхи його усунення

Найбільшим недоліком БГ є так званий ефект «змиву» (downwash), тобто сильний перпендикулярний повітряний потік, створюваний роторами. Це явище може спричинити порушення розподілу повітря навколо дрона, і, таким чином, вплинути на продуктивність бортових датчиків [10, 11]. Цей ефект є незначним на відстані декількох десятків сантиметрів над дроном, проте під БПЛА «змив» може поширюватися на декілька метрів [12, 13]. Це локальне змішування повітря створює негативний вплив на вимірювання датчиків БПЛА через сильні просторові градієнти параметрів атмосферного повітря. Це, в свою чергу, створює суттєві труднощі щодо вибору правильного розміщення вимірювальних пристроїв (датчиків) на борту БПЛА.

Явище «змиву» не впливає на достовірність та точність вимірювань високоточним оптичним аналізатором, проте інші датчики можуть фіксувати занижені рівні концентрації досліджуваних газів [14]. Таким чином, оптичні аналізатори можна прикріпити безпосередньо під корпусом дрона [15] (рис. 1 а, б), але для інших датчиків необхідно застосовувати більш складні підходи, щоб отримати вимірювання концентрації газу з високою точністю.

«Змив» найслабший у горизонтальних напрямках. Тому багато дослідницьких груп розміщують свої вимірювальні системи на штанзі, яка дозволяє відбирати зразки незбуреного повітря (рис. 1 в). Однак, такий підхід, дестабілізує центр тяжіння дрона, і, таким чином, робить його аеродинамічно неефективним [16].

Іншим рішенням є використання насосних систем із входом, розташованим далеко від платформи (рис. 1 г, д). Конструкції з горизонтальною або вертикальною пробовідбірною трубкою застосовували багато дослідників [17]. Цей підхід також широко використовується в комерційних системах, наприклад, AirDrone, SnifferDrone, Scentroid DR1000, Aeromon BH-12. Основним недоліком цього методу є те, що застосування довгих трубок може призвести до збільшення часу відгуку через адсорбцію певних газів на внутрішніх стінках трубок.

Для підходів, які не вимагають вимірювання концентрації газу з високою точністю, корисне навантаження може бути встановлено безпосередньо на корпусі дрона. З цієї метою невеликі недорогі датчики часто розміщують перед роторами [18, 19] або прикріплюють до верхньої частини БПЛА [20] (рис. 1 е).

В роботі [21] дослідники для визначення хімічних речовин у повітрі провели тестування детектора ChemDet на БПЛА різних розмірів і, відповідно, різного корисного навантаження. Для тестування «змиву» використовувався БПЛА DJI Inspire 2 (Shenzhen, China). Модель БПЛА DJI M600 з розробленим корисним навантаженням для моніторингу стану атмосферного повітря показано на рис. 2 [22].

Автори [21] відзначають, що проблема «змиву» загальновідома і вона ретельно досліджувалася під час вивчення комбінації БПЛА та датчика газу. Обортові гвинти створюють сильний турбулентний повітряний потік під літальним апаратом, який може розріджувати або навіть виштовхувати повітряну масу, тим самим видаляючи досліджуваний газ. Це суттєво впливає на показання датчика через зміну концентрації газу під БПЛА [23].

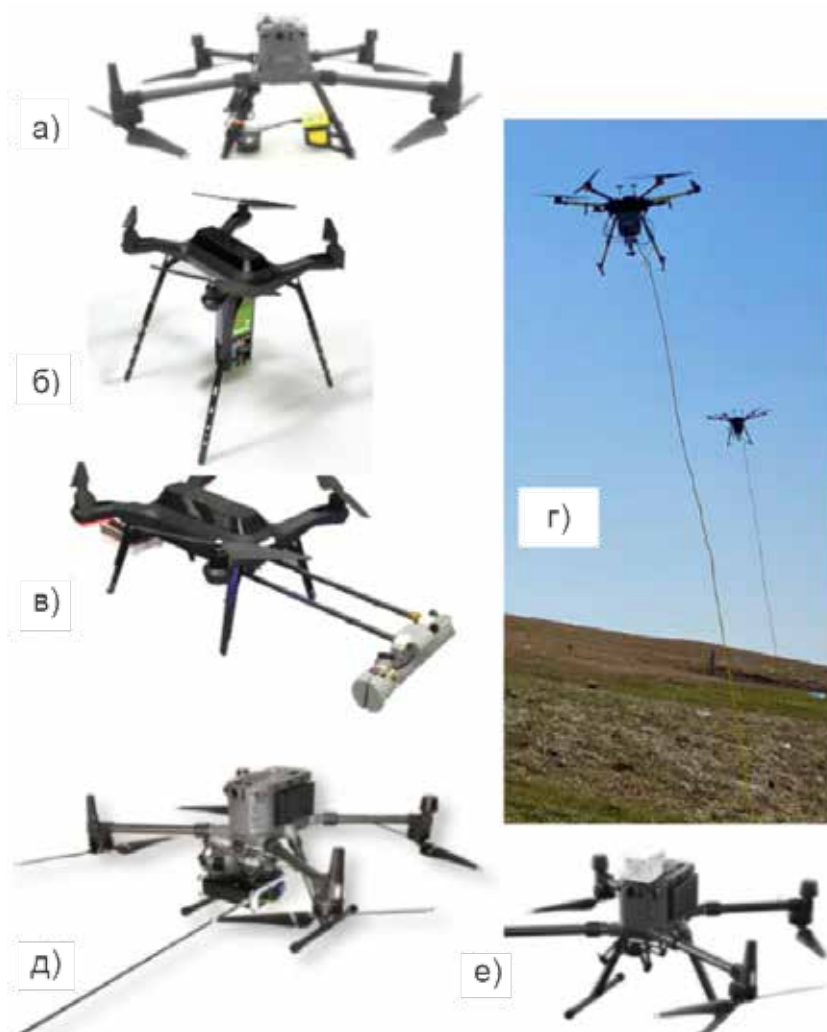


Рис. 1. Приклади встановлення корисного навантаження на дрони [15, 16]:

- а) SkyHub із газоаналізатором, розміщеним безпосередньо в нижній частині корпусу дрона;**
- б) високоточний оптичний аналізатор sTDLAS Pergam Methane mini-G (SA3C50A), встановлений безпосередньо на дні корпусу дрона;**
- в) саморобна система з установкою корисного навантаження на штанзі;**
- г) SnifferDrone з довгою трубкою для відбору проб;**
- д) AirDrone з горизонтально розташованою входною трубкою;**
- е) Sniffer4D з корисним навантаженням, розміщеним безпосередньо на верхній частині корпусу дрона**

В роботі [24] для зменшення впливу роторів дронів на вимірювання концентрації газів у повітрі було використано повітряний насос CM-15-6 (Enomoto Micro Pump Mfg. Co., Ltd, Токіо, Японія). Подібно до інших датчиків і приладів повітряний насос був встановлений всередині мультисенсорної системи. Повітрязабірник був встановлений на відстані 200 мм від роторів на верхній пластині дрона. Швидкість потоку всмоктуваного повітря контролювалася обертанням двигуна повітряного насоса за допомогою функції широтно-імпульсної модуляції.

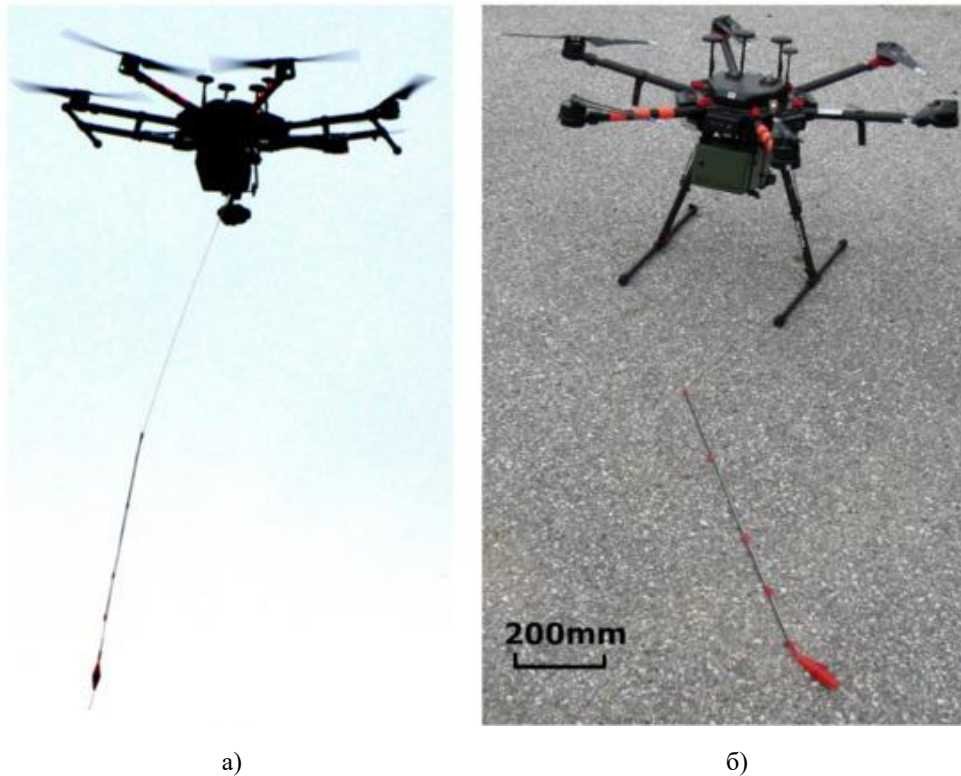


Рис. 2. БПЛА з ChemDet і системою труб (а) під час польоту та (б) перед зльотом

В роботах [25, 26] також досліджувався ефект «змиву» та здійснювалось моделювання повітряного потоку навколо роторів. Для експерименту авторами був використаний смітцевий бак як джерело викидів аміаку NH_3 . На бак був встановлений датчик даного газу ChemDet (рис. 3) і здійснювалось вимірювання його концентрації в умовах зависання БПЛА на різних відстанях від баку. Результати показали, що при відстанях більше 2-ох метрів обертання роторів БПЛА не створюють значних збурень повітря в місці розміщення датчика, і чим більша відстань, тим меншим був вплив. А при наближенні БПЛА до смітника створювався значний потік турбулентного повітря біля датчику аміаку, що зменшувало концентрацію досліджуваного газу в 2–5 разів. Тому, для усунення ефекту «змиву» вчені оснастили мультисенсорний БПЛА довгою силіконовою гумовою трубкою довжиною 2 м з вагою на кінці (рис. 4).

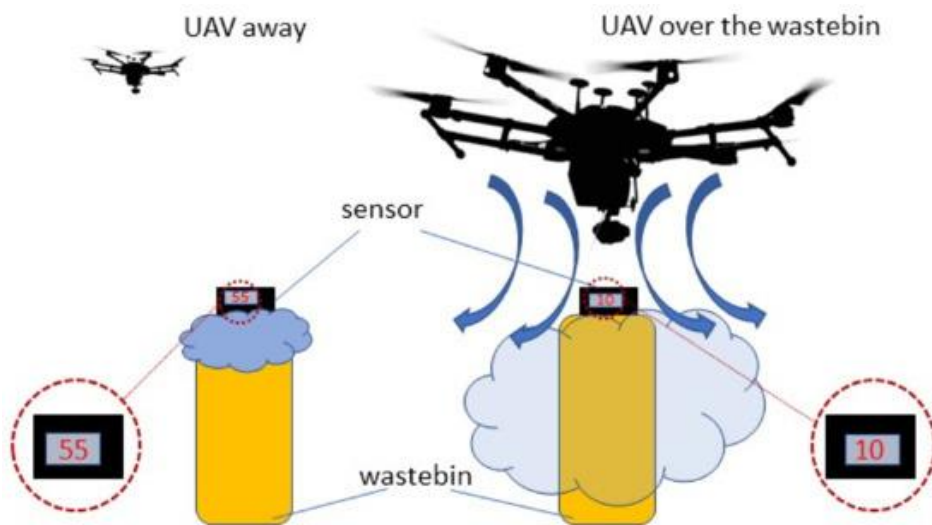


Рис. 3. Схематичне представлення експерименту з використанням БПЛА та датчика аміаку ChemDet, розміщеного на смітцевому баку, для демонстрації виникнення ефекту «змиву»

Також вченими вирішувалась проблема забезпечення надійного кріплення даної трубки до корпусу БПЛА. Було визначено, що оптимальним рішенням є використання магнітного фітингу. Це кріплення було достатньо міцним, щоб не втратити трубку під час регулярних операцій, але достатньо слабким, щоб БПЛА міг розірвати з'єднання різким рухом у разі заплутування трубки.

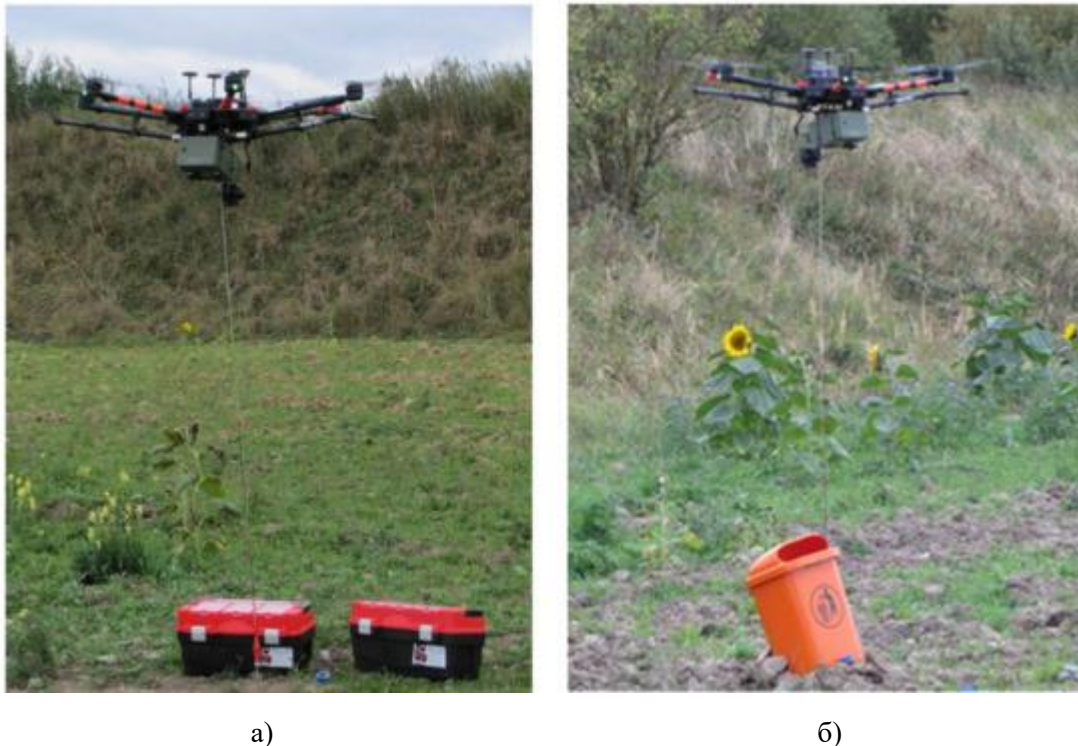


Рис. 4. Використання БПЛА з трубкою для усунення ефекту «змиву» при вимірюванні концентрації забруднюючих речовин від: а) закритих ящиків, б) відра для сміття

Знімок екрана з панелі оператора, що вказує на виявлення аміаку при рівнях концентрації, які були набагато вищими за попередньо визначений поріг концентрації. Під час вимірювання датчик аміаку досяг насичення, яке видно на графіку для NH_3 . Також здійснювалось вимірювання концентрацій і інших речовин в ppm. Червоний індикатор показує перевищення порогової концентрації для аміаку (рис. 5).

Висновки

Існуючі наземні стаціонарні станції моніторингу якості повітря є малоефективними (не дозволяють оперативно отримувати необхідну корисну інформацію про забруднення території) в складних умовах при надзвичайній ситуації з хімічним або радіаційним фактором ураження. Така проблема створює суттєві ризики для здоров'я населення та персоналу підприємств і організацій, що опинилися в зоні потенційного ураження.

Цю проблему можна вирішити застосувавши системи моніторингу, які базуються на мобільних платформах, а саме БПЛА. Їх можливості дозволяють потрапити на місце надзвичайної ситуації в умовах складного рельєфу місцевості, наявності важкопрохідної рослинності, руйнації або аварійно-небезпечного стану об'єкту, великої пожежі або вибухів на території об'єкту, важкої погодної обстановки. При цьому значно зменшується час отримання необхідних даних для прийняття вчасних ефективних управлінських рішень службами реагування.

Наукові дослідження багатьох вчених різних країн світу щодо використання БПЛА для вимірювання концентрацій забруднюючих речовин показують наявність ефекту «змиву», що спричиняє порушення розподілу повітря навколо дрона, і, таким чином, впливає на продуктивність бортових датчиків. Даний ефект виникає саме у нижній частині вимірювального комплексу на базі БПЛА через швидке обертання його роторів (над корпусом дрона даний ефект є незначним). Через це створюється турбулентний потік, що виштовхує повітряну масу під БПЛА, тим самим суттєво зменшуючи концентрації досліджуваних газів в місці розташування датчиків.

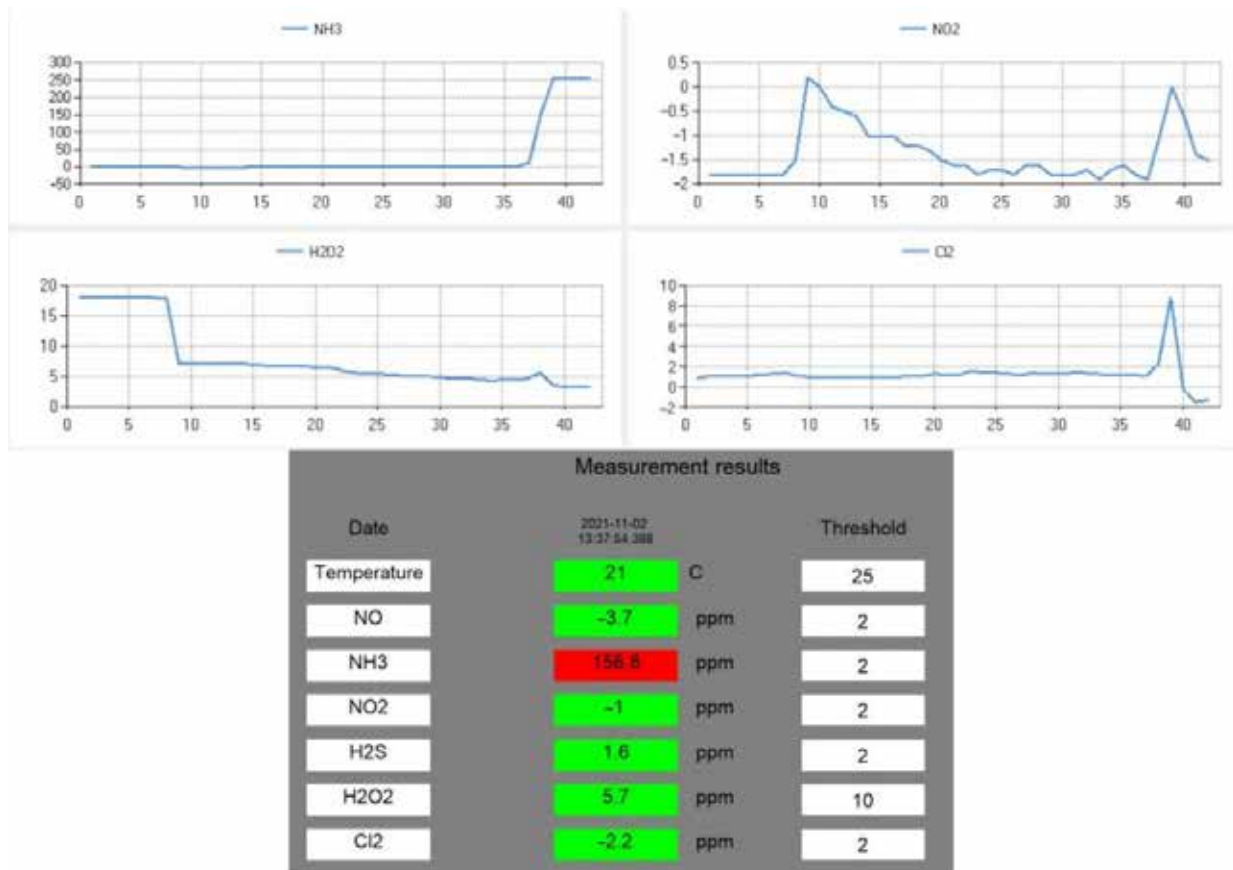


Рис. 5. Приклад показань датчиків на борту БПЛА при вимірюванні концентрацій забруднюючих речовин

На сьогоднішній день для зменшення ефекту «змиву» існують різні технічні рішення розміщення вимірювальних систем на БПЛА, що дозволяє збільшувати точність вимірювання концентрацій забруднюючих речовин в атмосферному повітрі. Найбільш ефективним є використання силіконової гумової трубки довжиною 2 м та вагою на кінці, що дозволяє здійснювати відбір повітря на відстані для усунення впливу даного ефекту.

Однак розміщення додаткового обладнання на корпусі БПЛА зменшує аеродинамічні характеристики його польоту (маневреність, висота, швидкість, дальність тощо), а тому вчені продовжують дослідження в цій проблематиці для отримання оптимального рішення.

Список використаних джерел:

1. Jońca J., PawnuK M., Bezyk Y., Arsen A., Sówka I. Drone-Assisted Monitoring of Atmospheric Pollution – A Comprehensive Review. Sustainability. 2022. Vol. 14(18). 11516. URL: <https://doi.org/10.3390/su141811516>
2. ЗАКОН УКРАЇНИ «Про охорону атмосферного повітря» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2707-12#Text>
3. Oleniacz R., Gorzelnik T. Assessment of the Variability of Air Pollutant Concentrations at Industrial, Traffic and Urban Background Stations in Krakow (Poland) Using Statistical Methods. Sustainability. 2021. Vol. 13. 5623. URL: <https://doi.org/10.3390/su13105623>
4. Chamola V., Kotesb P., Agarwal A., Naren Gupta N., Guizani M. A Comprehensive Review of Unmanned Aerial Vehicle Attacks and Neutralization Techniques. Ad Hoc Netw. 2021. Vol. 111. 102324. URL: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2020.102324>
5. Boon M. A., Drijfhout A. P., Tesfamichael, S. Comparison of a fixed-wing and multi-rotor uav for environmental mapping applications: A case study. Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci. 2017. Vol. XLII-2-W6. P. 47–54. URL: <http://dx.doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W6-47-2017>
6. Ducard G. J. J., Allenspach M. Review of designs and flight control techniques of hybrid and convertible VTOL UAVs. Aerosp. Sci. Technol. 2021. Vol. 118. 107035. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2021.107035>
7. Zhou Y., Zhao H., Liu Y. An evaluative review of the VTOL technologies for unmanned and manned aerial vehicles. Comput. Commun. 2020. Vol. 149. P. 356–369. URL: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2019.10.016>

8. Lee C., Kim S., Chu B. A Survey: Flight Mechanism and Mechanical Structure of the UAV. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2021. Vol. 22. P. 719–743. <https://doi.org/10.1007/s12541-021-00489-y>
9. Ito S., Akaiwa K., Funabashi Y., Nishikawa H., Kong X., Taniguchi I., Tomiyama H. Load and Wind Aware Routing of Delivery Drones. *Drones.* 2022. Vol. 6. 50. URL: <https://doi.org/10.3390/drones6020050>
10. Kaliszewski M., Włodarski M., Młyńczak J., Jankiewicz B., Auer L., Bartosewicz B., Liszewska M., Budner B., Szala M., Schneider B., et al. The Multi-Gas Sensor for Remote UAV and UGV Missions–Development and Tests. *Sensors* 2021. Vol. 21. 7608. URL: <https://doi.org/10.3390/s21227608>
11. Madokoro H., Kiguchi O., Nagayoshi T., Chiba T., Inoue M., Chiyonobu S., Nix S., Woo H., Sato K. Development of Drone-Mounted Multiple Sensing System with Advanced Mobility for In Situ Atmospheric Measurement: A Case Study Focusing on PM2.5 Local Distribution. *Sensors.* 2021. Vol. 21. 4881. URL: <https://doi.org/10.3390/s21144881>
12. Villa T. F., Salimi F., Morton K., Morawska L., Gonzalez F. Development and Validation of a UAV Based System for Air Pollution Measurements. *Sensors.* 2016. 16. 2202. URL: <https://doi.org/10.3390/s16122202>
13. Burgués J., Esclapez M.D., Doñate S., Marco S. RHINOS: A lightweight portable electronic nose for real-time odor quantification in wastewater treatment plants. *iScience.* 2021. 24. 103371. URL: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.103371>
14. Hutchinson M., Liu C., Chen W.H. Source term estimation of a hazardous airborne release using an unmanned aerial vehicle. *J. Field Robot.* 2019. Vol. 36. P. 797–817. URL: <https://doi.org/10.1002/rob.21844>
15. Oberle F. K. J., Gibbs A. E., Richmond B. M., Erikson L. H., Waldrop M. P., Swarzenski P. W. Towards determining spatial methane distribution on Arctic permafrost bluffs with an unmanned aerial system. *SN Appl. Sci.* 2019. Vol. 1. 236. URL: <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0242-9>
16. Smith B. J., John G., Christensen L. E., Chen Y. Fugitive methane leak detection using sUAS and miniature laser spectrometer payload: System, application and groundtruthing tests. In *Proceedings of the 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Miami, FL, USA, 13–16 June 2017*; pp. 369–374. URL: <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991403>
17. Cichowicz R., Dobrzański M. Modeling Pollutant Emissions: Influence of Two Heat and Power Plants on Urban Air Quality. *Energies.* 2021. Vol. 14. 5218. URL: <http://dx.doi.org/10.3390/en14175218>
18. Koval A., Irigoyen E., Koval T. A. R. Drone as a platform for measurements. In *Proceedings of the 2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), Kyiv, Ukraine, 18–20 April 2017*; pp. 424–427. URL: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2017.7939812>
19. Takei Y., Kanazawa Y., Hirasawa K., Nanto H. Development of 3D gas source localization using multi-copter with gas sensor array. In *Proceedings of the 2019 IEEE International Symposium on Olfaction and Electronic Nose (ISOEN), Fukuoka, Japan, 26–29 May 2019*; pp. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/ISOEN.2019.8823396>
20. Burgués J., Hernández V., Lilienthal A. J., Marco S. Smelling Nano Aerial Vehicle for Gas Source Localization and Mapping. *Sensors.* 2019. Vol. 19. 478. URL: <https://doi.org/10.3390/s19030478>
21. Kaliszewski M., Włodarski M., Młyńczak J., Jankiewicz B., Auer L., Bartosewicz B., Liszewska M., Budner B., Szala M., Schneider B., Povoden G., Kopczyński K. The Multi-Gas Sensor for Remote UAV and UGV Missions–Development and Tests. *Sensors.* 2021. Vol. 21. 7608. URL: <https://doi.org/10.3390/s21227608>
22. DJI. M600 Specifications. URL: <https://www.dji.com/uk/matrice600-pro/info#specs>
23. Burgués J., Marco S. Environmental chemical sensing using small drones: A review. *Sci. Total Environ.* 2020. Vol. 748. 141172. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141172>
24. Madokoro H., Kiguchi O., Nagayoshi T., Chiba T., Inoue M., Chiyonobu S., Nix S., Woo H., Sato K. Development of Drone-Mounted Multiple Sensing System with Advanced Mobility for In Situ Atmospheric Measurement: A Case Study Focusing on PM2.5 Local Distribution. *Sensors.* 2021. Vol. 21. 4881. URL: <https://doi.org/10.3390/s21144881>
25. Yang F., Xue X., Cai C., Sun Z., Zhou Q. Numerical Simulation and Analysis on Spray Drift Movement of Multicopter Plant Protection Unmanned Aerial Vehicle. *Energies.* 2018. Vol. 11. 2399. URL: <https://doi.org/10.3390/en11092399>
26. Wu Y., Qi L., Zhang H., Musiu E.M., Yang Z., Wang P. Design of UAV Downwash Airflow Field Detection System Based on Strain Effect Principle. *Sensors* 2019. Vol. 19. 2630. URL: <https://doi.org/10.3390/s19112630>

УДК 519.1:519.7:007.5

DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.3.5>**Андрій СТЬОПКІН**кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри математики та інформатики ДВНЗ «Донбаський державний педагогічний університет», stepkin.andrej@gmail.com

ORCID: 0000-0002-6130-9920

МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА РОЗПІЗНАВАННЯ НЕОРІЄНТОВАНИХ ГРАФІВ**Анотація.** Робота присвячена проблемі розпізнавання простих неорієнтованих графів мобільними агентами.**Метою роботи** є побудова нового ефективного алгоритму розпізнавання скінчених неорієнтованих графів без петель та кратних ребер мультиагентною системою. В статті запропоновано наступну **методологію** до досягнення поставленої мети: використати мультиагентну систему, що складається з трьох агентів двох різних типів. Перший тип – це агенти-дослідники, які рухаються по графу, можуть зчитувати мітки на елементах графу й змінювати забарвлення цих елементів. Також ці агенти можуть обмінюватися повідомленнями з агентом другого типу. Агенти-дослідники мають скінчену пам'ять та для розпізнавання графу використовують по дві фарби різного кольору кожен (всього три фарби різного кольору). Другий тип – це агент-експериментатор – нерухомий агент, що знаходиться поза межами графу, в пам'яті якого на кожному кроці фіксується результат функціонування агентів-дослідників. На основі отриманої інформації агент-експериментатор в своїй пам'яті поступово вибудовує представлення досліджуваного графа списком ребер і списком вершин. У статті детально розглянуто режими роботи агентів-дослідників із зазначенням пріоритетності активації цих режимів в процесі роботи. Також наведено алгоритм роботи агента-експериментатора з детальним описом процедур обробки отриманих повідомлень, на підставі яких і відбувається розпізнавання досліджуваного графа. Також в статті проведено аналіз часової, ємнісної, комунікаційної складності побудованого алгоритму та проаналізовано кількість переходів по ребрах, які необхідно виконати агентам-дослідникам для повного розпізнавання графа.**Науковою новизною** є отримання більш ефективного алгоритму розпізнавання графів, який дозволяє використовувати агентів-дослідників зі скінченною пам'яттю та дає можливість в подальшому масштабувати розглянуту мультиагентну систему до k агентів.**Висновки.** Таким чином, в роботі запропоновано новий алгоритм розпізнавання графів, який має квадратичні (від числа вершин досліджуваного графа) часову, ємнісну та комунікаційну складності. Кількість переходів по ребрах, які виконують агенти-дослідники оцінюється як $O(n)$ де n – кількість вершин досліджуваного графа. Робота запропонованого алгоритму розпізнавання ґрунтується на методі обходу графа в глибину.**Ключові слова:** розпізнавання графів, прості скінчені графи складність алгоритму, обхід в глибину, колектив агентів.**Andrii STOPKIN. MULTI-AGENT SYSTEM FOR NON-ORIENTED GRAPHS EXPLORATION****Abstract.** The work is devoted to the problem of simple undirected graphs exploration by mobile agents.**The purpose** of this work is to develop a new effective algorithm for exploring undirected graphs without loops and multiple edges by a multi-agent system. The article proposes the next **methodology** to achieve the goal: to use a multi-agent system that consists of three agents of two different types. The first type is agents-researchers, that move along the graph, can read the labels on the graph elements and color these elements. Also, these agents can exchange messages with the second type of agent. Agents-researchers have a finite memory and use two different colors each (total of three different colors) to a graph exploration. The second type is an agent-experimenter is a stationary agent located outside the graph, in whose memory the result of the functioning of the agents-researchers is recorded at each step. On the basis of the received information, the agent-experimenter in his memory gradually builds a map of the investigated graph. In the article in detail examines the modes of operation of agents-researchers with an indication of the priority of activation of these modes. Also given the algorithm of the agent-experimenter with a detailed description of the procedures for processing the received messages, on the basis of which the graph is explored. Also, the article analyzes the time, space, and communication complexity of the algorithm and analyzes the number of transitions along the edges that must be performed by agents-researchers for complete the graph exploration.**A scientific novelty** is the development of a more efficient graph exploration algorithm, which allows the use of agents-researchers with finite memory and makes it possible to further scale the considered multi-agent system up to k agents.**Conclusions.** Thus, the paper proposes a new graph exploration algorithm that has quadratic (from the number of nodes of the graph) time, space and communication complexities. The number of edge transitions performed by agents-researchers is estimated as $O(n)$, where n is the number of nodes of the investigated graph. The algorithm is based on depth-first traversal method.**Key words:** graph recognition, simple finite graphs, algorithm complexity, depth traversal, collective of agents.**Вступ. Постановка проблеми** в загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями. В наш час у світі існує величезна кількість різноманітних недосліджених середовищ [1]. Причому задачі з розпізнавання досить різноманітні, починаючи з дослідження невеликих середовищ за допомогою наноботів [13] і закінчуючи дослідженням масштабних поверхонь віддалених планет, за допомогою планетоходів. На наш погляд, це є однією з основних причин активного розвитку такого напряму математичної кібернетики як теорія дискретних динамічних систем. Дослідження

середовища – це свого роду дискретна система, представлена як модель взаємодії керуючої та керованої систем, взаємодія яких найчастіше представляється як процес переміщення керуючого автомата графом керованої системи. Що, зрештою, і призвело до інтенсивного розвитку дослідження поведінки автоматів в лабіринтах [9, 16]. Також в наш час досить активно вивчаються різноманітні мультиагентні системи. В залежності від цілей, проблеми керування мультиагентними системами можна умовно розділити на три основні види: проблема керування групою агентів [5, 14], проблема формації групи агентів [6, 11] та проблеми консенсусу [2, 18]. Всі види активно досліджуються в наш час.

Враховуючи вищесказане, можна зробити висновок, що дослідження питання розпізнавання графів за допомогою колективу агентів є досить актуальним. Що, в свою чергу, робить актуальною задачу проведення систематичного дослідження експериментів з розпізнавання графів колективом агентів, що блукають по ньому. Тобто створення маршрутів руху агентів по невідомому графу, розмітки його елементів, збору та обробки локальної інформації про граф та способів побудови мапи графа за цією інформацією, з точністю до позначок на елементах графа. А також завдання, пов'язані з оптимізацією витрат ресурсів та витрат часу на розпізнавання графів. Зрозуміло, що при розпізнаванні графа декількома агентами, що блукають по ньому, основною проблемою є проблема ефективності їх взаємодії, з метою зменшення витрат часу і пам'яті на розпізнавання. Потрібно розробити такі алгоритми переміщення, у яких блукаючі агенти не заважають один одному і не дублюють роботу один одного. Таким чином, **метою роботи** є створення ефективного методу і побудова відповідного алгоритму розпізнавання (побудови мапи) неорієнтованих простих графів за допомогою колективу агентів, а також дослідження часової, ємнісної, комунікаційної складності побудованого алгоритму та кількості переходів по ребрах, які виконують агенти-дослідники для повного розпізнавання графа. У роботі розглядається колектив із трьох агентів: два агента-дослідника блукають по графу, перефарбовують його елементи та передають інформацію про свої дії агенту-експериментатору. Взаємодія агентів-дослідників здійснюється за рахунок фарбування елементів графа. Розглянемо алгоритм вирішення нашої проблеми у разі, коли два агенти-дослідники A і B одночасно пересуваються по невідомому скінченному неорієнтованому простому графу та обмінюються інформацією з агентом-експериментатором, який і будує мапу досліджуваного графу в своїй пам'яті у вигляді списків ребер та списків вершин. У роботі запропоновано алгоритм побудови маршрутів агентами-дослідниками, що дозволяють агенту-експериментатору точно розпізнати граф. Кожному агенту-досліднику для роботи необхідно дві фарби різного кольору: у агента A це червона та чорна (r і b), у агента B – жовта і чорна (y і b). Тобто агентам необхідно всього три фарби різного кольору. Алгоритм заснований на методі обходу графа в глибину [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Початком досліджень проблеми обходу графів прийнято вважати роботу К. Шеннона [15]. Активне ж вивчення особливостей функціонування автоматів в лабіринтах починається з дослідження К. Делпа [7], який вивчав поведінку автоматів при роботі в шахових лабіринтах. Також вивченням даного питання займався Г. Дудек [8, 10] в роботах якого проводилися дослідження властивостей невідомого середовища при різній взаємодії автомата з операційним середовищем та при різній апріорній інформації про нього. В тому числі й за умови роботи мультиагентних систем [10]. В подальшому вивчення особливостей роботи мультиагентних систем знайшло свій розвиток в низці праць [4, 10, 12, 16, 17].

Виклад основного матеріалу дослідження.

Нехай $G=(V,E)$ – зв'язний неорієнтований скінчений граф без петель і кратних ребер, де V – множина вершин, E – множина ребер (двохелементних підмножин (v,u) , де $v,u \in V$). Трійку $((v,u),u)$ будемо називати інцидентором (точкою з'єднання) ребра (v,u) і вершини u . Послідовність u_1, u_2, \dots, u_k попарно суміжних вершин графа G називається шляхом довжини k . Околом $Q(v)$ вершини v , будемо називати множину елементів графа, що складається з самої вершини v , всіх вершин u суміжних з v всіх ребер (v,u) та всіх інциденторів $((v,u),v), ((v,u),u)$. Потужність множин вершин V та ребер E позначимо через n та m відповідно. Зрозуміло, що $m \leq \frac{n(n-1)}{2}$ елементів. Ізоморфізмом графа G і графа H назвемо таку бієкцію $\varphi: V_G \rightarrow V_H$, що $(v,u) \in E_G$, тоді й тільки тоді, коли $(\varphi(v), \varphi(u)) \in E_H$. Таким чином, ізоморфні графи рівні з точністю до позначення вершин та розфарбування їх елементів. Зворотним ребром для агента-дослідника називатимемо біле ребро, дальня вершина якого забарвлена в «свій» колір. Під перешийком розуміємо ребро, що з'єднує вершини, що належать областям роботи різних агентів-дослідників. Зазначимо, що колектив агентів, який ми розглядаємо складається з трьох агентів: два агенти-дослідники A і B та один агент-експериментатор. Агенти дослідники можуть рухатись по графу, змінювати забарвлення елементів графа, записувати номери в вершини графа та передавати повідомлення про свої дії агенту експериментатору, який аналізуючі отримані повідомлення, будує мапу графа (у вигляді списків вершин та списків ребер) в своїй пам'яті. Агенти-дослідники мають скінчену пам'ять. На початку роботи вони поміщаються в довільні неспівпадаючі вершини графа G та одразу

нумерують їх і передають номери агенту-експериментатору, який одразу додає їх в множину вершин V_n . Перебуваючи у вершині v , агент-дослідник може сприймати мітки всіх елементів околу $Q(v)$ та номери суміжних із нею вершин. Спираючись на цю інформацію він визначає, по якому ребру буде далі переміщатися, і як фарбуватиме елементи графа. Агент-експериментатор передає, приймає та ідентифікує повідомлення, отримані від агента-дослідника, має скінчену на кожному кроці, але необмежено зростаючу внутрішню пам'ять. Розглянемо режими роботи агентів-дослідників. При описанні режимів, у дужках будемо зазначати повідомлення, які відправляють агенти-дослідники агенту-експериментатору, працюючи в цих режимах (MESSAGE_A; MESSAGE_B). Агент-експериментатор, в свою чергу, обробляє отримане повідомлення та відправляє агенту досліднику дані, необхідні для завершення ходу.

Звичайний режим роботи. Агент-дослідник обирає з околу вершини, в якій він знаходиться, довільну білу вершину і переходить до неї. Таким чином агент-дослідник рухається вперед по білих вершинах, фарбуючи вершини, ребра, що їх з'єднують та дальні інцидентори в «свій» колір (FORWARD_A; FORWARD_B), далі отримавши від агента-експериментатора номер, записує його у вершину. Якщо в околі вершини, в якій стоїть агент-дослідник не знайдеться білої вершини, для подальшого руху вперед, то агент-дослідник A відправляє агенту-експериментатору повідомлення ASSIGN_A, на що витрачає один хід, далі повертається назад, забарвлюючи пройдені вершини, ребра та ближні інцидентори в чорний колір (BACK_A). Агент-дослідник B , не виявивши білої вершини для подальшого руху вперед, відразу починає рух назад, забарвлюючи пройдені вершини, ребра та ближні інцидентори у чорний колір (BACK_B). Повернувшись у початкову вершину, агент-дослідник завершує роботу (STOP_A; STOP_B). Таким чином будується два дерева методом обходу графа в глибину.

Режим розпізнавання зворотних ребер. Якщо під час руху вперед було виявлено зворотне ребро, то агент-дослідник сканує окіл вершини в якій він знаходиться, покроково зчитує номери всіх суміжних вершин, інцидентних зворотним ребрам, фарбуючи ближній інцидентор в чорний колір, і відправляє номер агенту-експериментатору (INV_A(x); INV_B(k)), де x, k – номери, записані агентами A і B , відповідно, у вершинах свого шляху.

Режим розпізнавання перешийків. Цей режим дещо відрізняється для кожного з агентів-дослідників. Якщо, при русі вперед, агент A виявив у вершині перешийки обидва інцидентори яких білі, і в жодній з дальніх вершин цих перешийків немає агента B (або агент B перебуває у одній з цих вершин, але вже розпізнав всі, раніше виявлені ним, перешийки у поточну для себе вершину, або агент B виконує повернення назад своїм шляхом в звичайному режимі роботи), то агент A покроково відправляє агенту-експериментатору всі номери дальніх вершин перешийків (ISTHM_A(x), де x – номер, записаний агентом B , у вершині свого шляху), фарбуючи їх ближні інцидентори в чорний колір. Якщо агент B знаходиться в одній з дальніх вершин перешийків і ще не розпізнавав інцидентні їй перешийки або не повертається назад по своєму шляху, то агент A відправляє агенту-експериментатору номери всіх дальніх вершин, виявлених перешийків, фарбуючи ближній інцидентор в чорний колір, крім номера вершини, в якій знаходиться агент B . Зауважимо, що агент A , дізнається про знаходження агента B в суміжній вершині в результаті сканування околу на наявність перешийків, але про те чи можна розпізнавати перешийок в дальній вершині якого знаходиться B , агент A дізнається зі значення змінної mr_A , значення якої запитується у агента-експериментатора. Якщо ж, при русі вперед, перешийки з білими інциденторами виявив агент B і в жодній з дальніх вершин цих перешийків немає агента A (або A знаходиться в одній з цих вершин, але виконує повернення назад по своєму шляху), то B покроково передає агенту-експериментатору номери всіх дальніх вершин виявлених перешийків (ISTHM_B(k), де k – номер, записаний агентом A , у вершинах свого шляху). Якщо ж агент A знаходиться в одній з дальніх вершин перешийків і не виконує повернення назад своїм шляхом, то B не виконує жодних дій до виходу A з околу вершини, в якій знаходиться B . Агент B , дізнається про перебування A в суміжній вершині в результаті сканування околу на наявність перешийків, але про те чи можна розпізнавати перешийки за наявності в одній з дальніх вершин агента A , агент B дізнається зі значення змінної mr_B , що запитується у агента-експериментатора.

При одночасному попаданні двох агентів-дослідників в одну білу вершину кожен агент-дослідник забарвлює вершину наполовину, і вона стає червоно-жовтою. Агент B , на наступному кроці, відступає назад своїм шляхом, видаляючи мітки, залишені ним на попередньому кроці (видаляється фарба з ребра і ближнього інцидентора) (COME_BACK_B), і переключасться в звичайний режим роботи. Агент A бачить різнокольорову вершину як свою, але при розпізнаванні забарвлює у чорний колір всю вершину.

При попаданні агентів-дослідників у ситуацію, коли у вершині можливий вибір відразу кількох режимів роботи, першим буде обрано режим розпізнавання перешийків, за ним режим розпізнавання зворотних ребер і нарешті звичайний режим роботи. Потрапляння двох агентів дослідників в одну білу вершину тут не розглядається, оскільки така ситуація призведе до змін у роботі виключно агента B

і в цей момент інші режими роботи для нього будуть недоступні. Виконуючи обхід графа, агенти A і B створюють відповідно червоний та жовтий шляхи. Розглянемо принцип побудови агентами шляху «свого» кольору. При русі в білу вершину червоний (жовтий) шлях подовжується, при русі назад своїм шляхом – коротшає. Якщо агент-дослідник повернувся у вершину, з якої почав обхід графа, а в її околі не було білих вершин, то він забарвлює цю вершину в чорний колір та зупиняється. Алгоритм закінчує роботу, коли червоний та жовтий шляхи стають порожніми, а всі вершини чорними. Виконуючи обхід графа G агенти створюють нумерацію відвіданих вершин. Вперше відвідавши вершину агент A забарвлює її у червоний колір (агент B – у жовтий колір), записує в пам'ять вершини відповідний номер (отриманий від агента-експериментатора), рівний значенню змінної ct_A (ct_B для агента B). Розпізнавання графа G відбувається на основі створеної агентами-дослідниками нумерації шляхом побудови йому ізоморфного графа H .

Розглянемо алгоритм роботи агента-експериментатора:

Вхід: списки повідомлень M та N від агентів-дослідників.

Вихід: список вершин V_H та ребер E_H графа H , ізоморфного графу G .

Дані: V_H, E_H – списки вершин і ребер графа H , ізоморфного графу G .

ct_A, ct_B – лічильники, що використовуються для визначення числа відвіданих вершин агентами A і B відповідно. $STOP_A, STOP_B$ – змінні, що використовуються агентами A і B відповідно, для сигналізації агенту-експериментатору про завершення розпізнавання «своєї» області відповідним агентом-дослідником. mr_A – змінна, яка може набувати двох значень: «1» або «0». Значення «1» дозволяє агенту A розпізнавати перешийки, у будь-якому випадку. Значення «0» забороняє агенту A розпізнавати ті перешийки (якщо вони існують), у дальній вершині яких знаходиться агент B . mr_B – змінна, яка може набувати двох значень «1» або «0». Значення «1» дозволяє агенту B розпізнавати перешийки у будь-якому випадку. Значення «0» забороняє агенту B розпізнавання перешийків, якщо у дальній вершині одного з них знаходиться агент A . $r(1), r(2), \dots, r(t)$ – список номерів вершин червоного шляху, де t – довжина цього списку. $y(1), y(2), \dots, y(p)$ список номерів вершин жовтого шляху, де p – довжина цього списку. Mes – змінна в якій зберігається поточне повідомлення.

1. $ct_A := 1, ct_B := 1, M := \emptyset, N := \emptyset, E_H := \emptyset, STOP_A := 0, STOP_B := 0, mr_A := 0, mr_B := 0, t := 1, p := 1, r(t) := ct_A, y(p) := ct_B, V_H := \{A[1], B[1]\};$
2. *while* ($STOP_A = 0$) *or* ($STOP_B = 0$) *do*
3. *if* $M \neq \emptyset$ *then do*
4. прочитати у Mes повідомлення та видалити його з черги M ;
5. $LIST_PROCES_A()$;
6. *end do*;
7. *if* $N \neq \emptyset$ *then do*
8. прочитати у Mes повідомлення та видалити його з черги N ;
9. $LIST_PROCES_B()$;
10. *end do*;
11. *end do*;
12. друк V_H, E_H .

Розглянемо процедури, які використовуються в алгоритмі.

$LIST_PROCES_A()$:

1. *if* $Mes = "ISTHM_A(x)"$ *then* $ISTHM_A(x)$;
 2. *if* $Mes = "INV_A(x)"$ *then* $INV_A(x)$;
 3. *if* $Mes = "FORWARD_A"$ *then* $FORWARD_A()$;
 4. *if* $Mes = "ASSIGN_A"$ *then* $ASSIGN_A()$;
 5. *if* $Mes = "BACK_A"$ *then* $BACK_A()$;
 6. *if* $Mes = "STOP_A"$ *then* $STOP_A()$.
- $ISTHM_A(x)$: *if* ($B[x], A[r(t)] \notin E_H$) *then* $E_H := E_H \cup \{(A[r(t)], B[x])\}$.
- $INV_A(x)$: $E_H := E_H \cup \{(A[r(t)], A[x])\}$.
- $FORWARD_A()$: $ct_A := ct_A + 1$; $t := t + 1$; $r(t) := ct_A$; $V_H := V_H \cup \{A[ct_A]\}$;
- $E_H := E_H \cup \{(A[r(t-1)], A[r(t)])\}$; $mr_B := 0$.
- $ASSIGN_A()$: $mr_B := 1$.
- $BACK_A()$: зі списку $r(1), \dots, r(t)$ видаляється елемент $r(t)$; $t := t - 1$.
- $STOP_A()$: $STOP_A := 1$.

Процедури роботи зі списком повідомлень від агента B , які не розглянуті нижче, аналогічні до процедур роботи зі списком повідомлень від агента A .

LIST_PROCES_B():

1. if $Mes = "COME_BACK_B"$ then $COME_BACK_B()$;
2. if $Mes = "ISTHM_B(k)"$ then $ISTHM_B(k)$;
3. if $Mes = "INV_B(k)"$ then $INV_B(k)$;
4. if $Mes = "FORWARD_B"$ then $FORWARD_B()$;
5. if $Mes = "BACK_B"$ then $BACK_B()$;
6. if $Mes = "STOP_B"$ then $STOP_B()$.

$COME_BACK_B()$: $E_H := E_H \setminus \{(y(p-1), y(p))\}$; $V_H := V_H \setminus \{B[ct_B]\}$;
 $ct_B := ct_B - 1$; $p := p - 1$; $y(p) := ct_B$.

$ISTHM_B(k)$: if $(A[k], B[y(p)]) \notin E_H$ then $E_H := E_H \cup \{(B[y(p)], A[k])\}$; $mr_A := 1$.

$FORWARD_B()$: $ct_B := ct_B + 1$; $p := p + 1$; $y(p) := ct_B$; $V_H := V_H \cup \{B[ct_B]\}$;
 $E_H := E_H \cup \{(B[y(p-1)], B[y(p)])\}$; $mr_A := 0$.

$BACK_B()$: зі списку $y(1), \dots, y(p)$ видаляється $y(p)$; $p := p - 1$; $mr_A := 1$.

Розглянемо властивості наведеного алгоритму розпізнавання.

Теорема 1. Три агенти, виконавши алгоритм розпізнавання на графі G , розпізнають досліджуваний граф з точністю до ізоморфізму.

Доведення. Процедури $FORWARD_A()$ і $FORWARD_B()$ виконуються агентом-експериментатором, під час відвідування агентами-дослідниками білих вершин досліджуваного графа G . Цими процедурами створюється по одній новій вершині графа H . При одночасному попаданні агентів A і B в одну білу вершину процедурами $FORWARD_A()$ і $FORWARD_B()$ буде створено дві нові вершини графа H . Для того щоб не допустити подібне дублювання вершин, на наступному кроці агент B , процедурою $COME_BACK_B()$, видалить вершину, додану ним на попередньому кроці. Таким чином, виконання описаного алгоритму індукує відображення $\varphi: V_G \rightarrow V_H$. Причому $\varphi(v) = t$ (коли вершина v пофарбована в червоний колір і $t = ct_A$) і $\varphi(s) = p$ (коли вершина s пофарбована в жовтий колір і $p = ct_B$). Зазначене відображення φ є бієкцією, оскільки у зв'язному графі G всі вершини можна досягти з початкових вершин. При виконанні процедури $FORWARD_A()$ і $FORWARD_B()$ агент-експериментатор розпізнає ребро (v, u) , що належить дереву і так нумерує вершину u , що ребру (v, u) однозначно відповідає ребро $(\varphi(v), \varphi(u))$ графа H . При виконанні процедур $INV_A(x)$ або $INV_B(k)$ агент-експериментатор розпізнає зворотні ребра (v, u) графа G і ставить їм в однозначну відповідність ребра $(\varphi(v), \varphi(u))$ графа H . При виконанні $ISTHM_A(x)$ або $INV_B(k)$ агент-експериментатор розпізнає відповідно перешийки (v, u) або зворотні ребра (v, u) графа G і ставить їм в однозначну відповідність ребра $(\varphi(v), \varphi(u))$ графа H . Отже, φ є ізоморфізмом графа G на граф H . Що й треба було довести.

Теорема 2. Часова, ємнісна та комунікаційна складності алгоритму розпізнавання дорівнюють $O(n^2)$, а число переходів по ребрам, що здійснюють агенти дослідники оцінюється як $O(n)$. При цьому алгоритм використовує 3 фарби.

Доведення. Підрахуємо часову, ємнісну та комунікаційну складності алгоритму. З опису випливає, що на кожному кроці алгоритму червоний (жовтий) шлях – це простий шлях, що сполучає початкову вершину v (s – для агента B) з номером $\varphi(v) = 1$ ($\varphi(s) = 1$) з вершиною u (z) з номером $\varphi(u) = ct_A$ ($\varphi(z) = ct_B$). Отже, загальна довжина червоного та жовтого шляху не перевищує n .

При одноразовому виконанні процедур зі звичайного режиму роботи агент-дослідник проходить одне ребро, або ж, не виконуючи переміщень, відправляє одне повідомлення на що також витрачається один хід. При одноразовому виконанні процедур з режиму розпізнавання зворотних ребер агенти-дослідники розпізнають не більше $n-2$ зворотних ребер, на що витрачають витрачають не більше $n-1$ кроків (зчитування номерів дальніх вершин зворотних ребер та один хід на відправку повідомлення). При одноразовому виконанні процедури з режиму розпізнавання перешийків агенти-дослідники розпізнають не більше $n-2$ перешийки, на що так само йде не більше $n-1$ кроків (зчитування номерів дальніх вершин перешийків та один хід на відправку повідомлення). При одночасному попаданні двох агентів-дослідників в одну білу вершину агент A не змінює режим роботи, а агент B витрачає один хід на повернення в свою область. При підрахунку часової складності алгоритму вважатимемо, що ініціалізація алгоритму, аналіз околу $Q(v)$ робочої вершини та вибір однієї з можливих процедур займають певну постійну кількість одиниць часу. Також будемо вважати, що вибір ребер, прохід по них агента-дослідника та обробка повідомлень відправлених на даному етапі здійснюється за одну одиницю часу. Тоді часова складність алгоритму визначається наступним чином. Процедури зі звичайного режиму роботи виконуються не більше ніж $3 \times (n-2)$ раз, загальний час їх виконання оцінюється як $O(n)$. Процедури з режиму розпізнавання зворотних ребер виконуються не більше $n \times (n-1)$ раз, тобто загальний час їх виконання оцінюється як $O(n^2)$. Процедури з режиму розпізнавання перешийків виконуються

не більше $n \times (n-1)$ раз, тобто загальний час їх виконання оцінюється як $O(n^2)$. Час простою агентів в очікуванні оцінюється як $O(n^2)$. Отже, сумарна часова складність $T(n)$ алгоритму задовольняє наступному співвідношенню: $T(n) = O(n^2)$.

Таким чином, верхня оцінка числа переходів по ребрах, що здійснюються агентом-дослідником оцінюється зверху як $O(n)$.

Ємнісна складність $S(n)$ алгоритму визначається потужностями списків $V_H, E_H, r(1) \dots r(t), y(1) \dots y(p)$, які визначаються величинами $O(n), O(n^2), O(n), O(n)$ відповідно. Отже: $S(n) = O(n^2)$.

Комунікаційна складність $K(n)$ алгоритму визначається кількістю повідомлень, якими необхідно обмінятися агентам, для розпізнавання графа. Працюючи в звичайному режимі роботи, агенти-дослідники відправляють по одному повідомленню на кожному кроці, тобто передана інформація у цьому режимі оцінюється як $O(n)$. Агент-експериментатор при цьому передасть обсяг інформації, що також оцінюється як $O(n)$. Загальна кількість переданих повідомлень при роботі агентів в режимі розпізнавання зворотних ребер та в режимі розпізнавання перешийків оцінюється як $2 \times O(n^2)$. Отже, сумарна комунікаційна складність $K(n)$ алгоритму задовольняє наступному співвідношенню: $K(n) = O(n^2)$. *Що й треба було довести.*

Висновки

У роботі запропоновано новий алгоритм розпізнавання скінчених неорієнтованих графів часової складності, ємнісної та комунікаційної складностей рівними $O(n^2)$ та верхньою оцінкою числа переходів по ребрам, що здійснюють агенти-дослідники рівною $O(n)$. Агенти-дослідники мають скінчену пам'ять і використовують по дві фарби кожен (всього три фарби). Результати даного дослідження планують масштабувати на більшу кількість агентів для отримання більш ефективних алгоритмів розпізнавання графів.

Список використаних джерел:

1. Albers S., Henzinger M. R. Exploring unknown environments. *SIAM Journal on Computing*. 2000. 29 (4). P. 1164–1188.
2. Amirkhani A., Barshooi A. H. Consensus in multi-agent systems: a review. *Artif Intell Rev* 55, 3897–3935 (2022). <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10097-x>
3. Cormen O., Leiserson Ch., Rivest R., Stein C. Introduction to Algorithms Cambridge, 2009. 1292 p.
4. Das S., Flocchini P., Kutten S., Nayak A., Santoro N. Map construction of unknown graphs by multiple agents. *Theoretical Computer Science*. 2007. V.385, 1–3. P. 34–48.
5. Dey S., Xu, H. Intelligent Distributed Swarm Control for Large-Scale Multi-UAV Systems: A Hierarchical Learning Approach. *Electronics* 2023, 12(1):89. <https://doi.org/10.3390/electronics12010089>
6. Dongyu Li, Shuzhi Sam Ge, Wei He, Guangfu Ma, Lihua Xie. Multilayer formation control of multi-agent systems. *Automatica*. V 109. 2019 <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2019.108558>
7. Dopp K. Automaten in labirinth. *Elektronische Informationsverarbeitung und Kybernetik*. 1971. V.7, № 2. P. 79–94.
8. Dudek G., Jenkin M. Computational principles of mobile robotics. *Cambridge Univ. press*. 2000. 280 p.
9. Dudek G., Jenkin M., Milios E., Wilkes D. Map validation in a graphlike world. *Proceedings of the 13th International Joint Conference on Artificial Intelligence*. San Fransisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 1993. P. 1648–1653.
10. Dudek G., Jenkin M., Milios E., Wilkes D. Topological exploration with multiple robots. *Robotics with Application (ISORA): Proc. 7th International Symposium*. Alaska, 1998
11. Feng Xiao, Long Wang, Jie Chen, Yanping Gao. Finite-time formation control for multi-agent systems. *Automatica*. V 45, Issue 11. 2009. P. 2605–2611. <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2009.07.012>
12. Nagavarapu S. C., Vachhani L., Sinha A. et al. Generalizing Multi-agent Graph Exploration Techniques. *International Journal of Control, Automation and Systems*. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12555-019-0067-8>
13. Piña-García C., Rechy Ericka, Garcia-Vega Virginia. Using an Alternative Model in a Complex Environment for Nanorobotics Navigation. *Proceedings of the 16th International Conference on Computing*. Mexico City, Mexico, 2007. URL: http://magno-congreso.cic.ipn.mx/cd-2007/IEEE/paper_103.pdf
14. Selden M., Zhou J., Campos F., Lambert N., Drew D. and Pister K. S. J. BotNet: A Simulator for Studying the Effects of Accurate Communication Models on Multi-Agent and Swarm Control. *2021 International Symposium on Multi-Robot and Multi-Agent Systems (MRS)*, Cambridge, United Kingdom, 2021, pp. 101–109, doi: 10.1109/MRS50823.2021.9620611.
15. Shannon C.E. Presentation of a maze-solving machine. *Cybernetics Trans, of the 8 th Conf. of the JosiahMacy Jr. Found / Editor: H. Foerster*. 1951. P. 173–180.
16. Stepkin A. Using a Collective of Agents for Exploration of Undirected Graphs. *Cybernetics and Systems Analysis*. V.51, 2. 2015 223–233. <https://doi.org/10.1007/s10559-015-9715-z>
17. Zhang C. Parallelizing Depth-First Search for Robotic Graph Exploration. Harvard College, Cambridge, Massachusetts. 2010.
18. Zhang T, Ma X, Li H, Wang Z, Xie S, Luo J. Ordered-Bipartite Consensus of Multi-Agent Systems under Finite Time Control. *Applied Sciences*. 2022; 12(23):12337. <https://doi.org/10.3390/app122312337>

УДК 004.9
DOI <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.3.6>

Іван ШЕВЦОВ

аспірант кафедри електронних обчислювальних машин (ЕОМ), факультет комп'ютерної інженерії та управління, Харківський національний університет радіоелектроніки, ivan.shevtsov@nure.ua
ORCID: 0000-0003-0597-1589

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ EDGE COMPUTING ТА FOG COMPUTING У СИСТЕМАХ МЕДИЧНОГО МОНІТОРИНГУ

Анотація. Дана стаття присвячена порівняльному аналізу ефективності технологій Edge Computing та Fog Computing в системах медичного моніторингу.

Метою дослідження є вивчення переваг і недоліків кожної з технологій з метою визначення найбільш оптимального підходу для забезпечення стабільної та ефективної роботи систем медичного моніторингу.

Методологія дослідження включала аналіз наукових публікацій, оцінку архітектурних особливостей, швидкості обробки даних, стійкості до відмов, масштабованості та енергоспоживання технологій Edge та Fog Computing. Для досягнення цієї мети використовувалися методи системного аналізу, моделювання навантаження та інтеграційного аналізу для оцінки продуктивності та доцільності впровадження обраних технологій у медичних системах.

Наукова новизна роботи полягає у розробці методології для вибору оптимальної технології на основі специфічних вимог до продуктивності, надійності та енергозбереження в умовах реального часу.

Результати дослідження показали, що технологія Edge Computing забезпечує мінімальні затримки та високу швидкість реакції на зміну стану пацієнтів, що є критичним у реанімаційних відділеннях. Водночас, Fog Computing забезпечує більш гнучке масштабування і високу стійкість до відмов, що робить її ефективною для великих мереж або віддалених об'єктів, де необхідно обробляти великі обсяги даних.

Висновки підкреслюють, що вибір між цими технологіями залежить від специфіки завдань медичної інфраструктури: Edge Computing є оптимальним для швидкої локальної обробки, тоді як Fog Computing підходить для розподілених систем з високими вимогами до надійності та безпеки. Рекомендовано комбіноване використання обох технологій для створення гнучкої та адаптивної медичної інфраструктури.

Ключові слова: обробка даних, розподілені системи, затримка сигналу, обробка в реальному часі, хмарні технології.

Ivan SHEVTSOV. THE COMPARATIVE ANALYSIS OF THE EFFECTIVENESS OF EDGE COMPUTING AND FOG COMPUTING IN MEDICAL MONITORING SYSTEMS

Abstract. This article is dedicated to a comparative analysis of the effectiveness of Edge Computing and Fog Computing technologies in medical monitoring systems.

The aim of the study is to examine the advantages and disadvantages of each technology to determine the most optimal approach for ensuring stable and efficient operation of medical monitoring systems.

The methodology of the research involved analyzing scientific publications, evaluating architectural features, data processing speed, fault tolerance, scalability, and energy consumption of Edge and Fog Computing technologies. To achieve this aim, methods of systems analysis, load modeling, and integration analysis were used to assess the performance and feasibility of implementing the selected technologies in medical systems.

The scientific novelty of the work lies in developing a methodology for selecting the optimal technology based on specific requirements for performance, reliability, and energy efficiency in real-time conditions. The results of the study showed that Edge Computing technology provides minimal latency and high-speed response to changes in patient conditions, which is critical in intensive care units. Meanwhile, Fog Computing offers more flexible scalability and high fault tolerance, making it effective for large networks or remote sites where large volumes of data need to be processed.

The conclusions emphasize that the choice between these technologies depends on the specific tasks of the medical infrastructure: Edge Computing is optimal for rapid local processing, while Fog Computing is more suitable for distributed systems with high demands for reliability and security. A combined use of both technologies is recommended to create a flexible and adaptive medical infrastructure.

Key words: data processing, distributed systems, signal latency, real-time processing, cloud technologies.

Вступ. Постановка проблеми. З огляду на зростаючі вимоги до ефективності та надійності обробки даних у системах медичного моніторингу, актуальним є питання вибору відповідної технології для їх реалізації. Існують два основних підходи, що пропонують різні рівні розподілу обчислювальних ресурсів: Edge Computing та Fog Computing. Вирішення науково-технічної проблеми полягає в оптимізації процесу обробки даних, що включає мінімізацію затримок, підвищення надійності та забезпечення високої масштабованості систем. Окрім цього, важливою є задача зниження енергоспоживання, що набуває критичного значення в умовах обмежених ресурсів.

Науково-технічна проблема полягає в необхідності визначення найбільш ефективної технології з точки зору її адаптивності до різних технічних умов та середовищ, забезпечення стабільної роботи систем в умовах реального часу та максимального використання ресурсів інфраструктури. Порівняльний

аналіз Edge Computing та Fog Computing дозволить оцінити їхні можливості та обмеження, спрямовуючи увагу на такі параметри, як продуктивність, стійкість до відмов, енергоефективність та гнучкість впровадження в різні технічні середовища.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень, присвячених порівнянню ефективності edge computing та fog computing у системах медичного моніторингу, демонструє різні підходи до оптимізації обробки даних, підвищення продуктивності та безпеки. Ці дослідження висвітлюють важливість вибору відповідної технології залежно від специфічних вимог медичних додатків.

Hartmann M., Hashmi U.S., та Imran A. [7] аналізують переваги edge computing для систем охорони здоров'я, підкреслюючи можливість локальної обробки даних та зменшення затримок, що є критичним у медичному моніторингу. Це підтверджується і в дослідженні Ray P.P., Dash D., та De D. [15], які розглядають ефективність edge computing для медичних додатків IoT, звертаючи увагу на підвищення швидкості обробки даних та зменшення залежності від центральних серверів. З іншого боку, Laroui M. та співавт. [9] та Mutlag A.A. і його колеги [12] акцентують увагу на перевагах fog computing для IoT-систем у сфері охорони здоров'я. Вони обґрунтовують, що fog computing дозволяє ефективніше розподіляти обчислювальні завдання між різними рівнями інфраструктури, забезпечуючи зниження затримок і покращення управління ресурсами. Подібні висновки наведені в дослідженні Muneeb M., Ko K.-M., та Park Y.-H. [11], які пропонують багаторівневу архітектуру fog computing для обчислювально-інтенсивних IoT-додатків, що також підвищує надійність та ефективність медичних систем.

У свою чергу, дослідження Prasad V.K., Bhavsar M.D., та Tanwar S. [13] розглядає вплив моніторингу та управління ресурсами у гібридних системах, що поєднують fog та edge computing, на продуктивність медичних додатків. Shakarami A. та ін. [17] представляють систематичний огляд ресурсного забезпечення в edge і fog обчисленнях, акцентуючи на підходах до оптимізації ресурсів, що є ключовим для забезпечення стабільної роботи медичних IoT-додатків.

Безпека та конфіденційність є важливими аспектами у fog та edge обчисленнях, особливо у медичних додатках. Alwakeel A.M. [3] робить огляд основних проблем безпеки та конфіденційності, пов'язаних з цими технологіями, пропонуючи методи нейтралізації потенційних загроз. Подібні питання розглядають Seljakanmani S. та Sumathi M. [16], аналізуючи використання нечіткої логіки в поєднанні з fog та cloud computing для покращення продуктивності систем моніторингу здоров'я.

У дослідженні Dash S. та співавт. [5] йдеться про важливість інтеграції edge та fog computing у медичних системах для забезпечення ефективного моніторингу та реагування. Подібний акцент на інноваційні технології зроблено у Kumar V. та ін. [8], які порівнюють можливості fog і cloud computing, підкреслюючи значення fog computing для зменшення затримок у медичних додатках. Додане джерело розширює аналіз щодо використання технологій обробки даних у контексті прийняття рішень. Нестеров В. [1] досліджує вплив методів візуалізації даних на процеси прийняття бізнес-рішень, підкреслюючи важливість інтеграції edge та fog computing для покращення точності та швидкості аналізу інформації в медичних системах. Це дослідження є значущим для розуміння того, як ефективно поєднувати обчислювальні ресурси для підтримки процесів прийняття рішень в умовах динамічних та великих даних.

Загалом, дослідження демонструють, що як fog, так і edge computing мають свої переваги для медичного моніторингу, однак їх застосування залежить від конкретних умов використання. Вибір між цими технологіями повинен базуватися на вимогах до швидкості обробки даних, безпеки, управління ресурсами та доступності мережевої інфраструктури, що підтверджується висновками всіх згаданих дослідників.

Подальшого вивчення потребують питання аналізу ключових принципів та архітектурних особливостей технологій Edge Computing і Fog Computing у контексті їхнього використання в системах медичного моніторингу; вивчення реальних прикладів застосування технологій Edge Computing і Fog Computing для оцінки їхньої ефективності з точки зору затримок, надійності, масштабованості та енергоспоживання; розробки методології для вибору найбільш підходящої технології на основі аналізу вимог до продуктивності, надійності та енергозбереження в системах медичного моніторингу.

Мета статті полягає у проведенні порівняльного аналізу ефективності технологій Edge Computing та Fog Computing у контексті їх застосування в системах медичного моніторингу, з метою визначення найбільш оптимального підходу для забезпечення стабільної та ефективної роботи цих систем.

Основні завдання статті включають:

1. Проведення аналізу ключових принципів та архітектурних особливостей технологій Edge Computing і Fog Computing у контексті їхнього використання в системах медичного моніторингу.
2. Вивчення реальних прикладів застосування технологій Edge Computing і Fog Computing для оцінки їхньої ефективності з точки зору затримок, надійності, масштабованості та енергоспоживання.

3. Визначення ситуацій і умов, у яких кожна з технологій демонструє максимальну ефективність, з урахуванням специфіки медичних інфраструктур.

4. Розробка методології для вибору найбільш підходящої технології на основі аналізу вимог до продуктивності, надійності та енергозбереження в системах медичного моніторингу.

5. Формулювання рекомендацій щодо оптимального впровадження Edge Computing або Fog Computing у системи медичного моніторингу, з урахуванням сучасних технічних викликів і ресурсних обмежень.

Виклад основного матеріалу. Технології обробки даних у сучасних медичних системах моніторингу відіграють критичну роль у забезпеченні оперативної та надійної реакції на зміни в стані здоров'я пацієнтів. Зі зростанням обсягу медичних даних і необхідністю їхньої обробки в режимі реального часу важливо обирати ефективні підходи до розподілу обчислювальних ресурсів. Edge Computing і Fog Computing є двома ключовими технологіями, які пропонують різні стратегії для вирішення цієї проблеми.

Edge Computing орієнтований на локальну обробку даних безпосередньо на пристроях, що генерують ці дані, тоді як Fog Computing розширює обчислення на проміжні вузли, наближаючи їх до джерел даних, але все ж залишаючи можливість використання централізованих хмарних ресурсів. Порівняльна характеристика технологій Edge Computing і Fog Computing у системах медичного моніторингу представлена в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика технологій Edge Computing і Fog Computing у системах медичного моніторингу

Параметр	Edge Computing	Fog Computing
Рівень обробки даних	Локальний, на рівні кінцевих пристроїв	Розподілений, між кінцевими пристроями та проміжними вузлами
Швидкість обробки	Висока, мінімальні затримки	Помірна, залежить від рівня розподілу обчислень
Вплив на інфраструктуру	Знижене навантаження на центральні сервери	Оптимізоване використання мережевих ресурсів
Стійкість до відмов	Обмежена, залежить від надійності локальних пристроїв	Вища, завдяки багаторівневій архітектурі та резервуванню ресурсів
Масштабованість	Обмежена кількістю та потужністю периферійних пристроїв	Висока, завдяки інтеграції з хмарними та проміжними обчисленнями
Енергоспоживання	Низьке, зосереджене на окремих задачах	Вища, через участь проміжних вузлів
Вартість впровадження	Низька, але може зростати з ускладненням мережі	Вища, враховуючи необхідність налаштування проміжних і хмарних ресурсів

Джерело: сформовано автором на підставі [7; 9; 17]

Edge Computing та Fog Computing мають принципові відмінності у підходах до розподілу обчислювальних ресурсів і обробки даних у системах медичного моніторингу. У випадку Edge Computing обробка даних здійснюється на локальному рівні, безпосередньо на пристроях, які збирають ці дані. Це дозволяє знизити затримки та підвищити швидкість реакції системи, що є критичним для медичних застосувань, де час є вирішальним фактором.

Однак така архітектура може обмежуватися надійністю локальних пристроїв і складністю масштабування системи. Fog Computing, у свою чергу, розширює обчислювальні можливості шляхом використання проміжних вузлів, які дозволяють ефективно розподіляти обчислення між периферією та хмарою. Це забезпечує кращу стійкість до відмов і гнучкість у масштабуванні, але вимагає більшого енергоспоживання і може призводити до підвищення вартості впровадження. Застосування цих технологій у сучасних умовах залежить від конкретних потреб медичної інфраструктури. Edge Computing найбільш ефективний у ситуаціях, де необхідна максимальна швидкість обробки даних з мінімальною затримкою, наприклад, у реанімаційних відділеннях. Fog Computing підходить для більш складних мереж, де важливе рівномірне розподілення обчислювальних задач і забезпечення надійної роботи систем у випадку великих обсягів даних або віддалених об'єктів. Показники ефективності технологій Edge Computing і Fog Computing у сучасних медичних системах моніторингу представлено в табл. 2.

Таблиця 2

**Показники ефективності технологій Edge Computing і Fog Computing
у сучасних медичних системах моніторингу**

Показник ефективності	Edge Computing	Fog Computing
Час реагування на події	< 1 мс	1-10 мс
Навантаження на мережу	Мінімальне	Середнє
Витрати на технічне обслуговування	Низькі	Помірні
Гнучкість адаптації	Низька	Висока
Інтеграція з хмарними технологіями	Мінімальна	Висока
Стійкість до мережевих відмов	Обмежена	Висока
Продуктивність у розподілених системах	Обмежена	Висока

Джерело: сформовано автором на підставі [2, 6, 10, 11]

Як видно з таблиці, Edge Computing забезпечує надзвичайно швидкий час реагування на події, що є ключовим показником для медичних застосувань, де кожна секунда може мати вирішальне значення. Однак ця технологія обмежена у своїй здатності до масштабування та адаптації, що може бути критичним у великих або складних медичних мережах. Fog Computing, натомість, забезпечує гнучкість у масштабуванні і стійкість до мережевих відмов, що робить її привабливою для застосування в складних інфраструктурах, де важлива надійність і стабільність роботи. При цьому ця технологія має середній рівень мережевого навантаження та потребує більших витрат на технічне обслуговування через складність налаштування та підтримки проміжних вузлів і інтеграції з хмарними сервісами.

У сучасних умовах вибір між Edge Computing та Fog Computing залежить від специфіки медичних завдань і технічних вимог. Edge Computing є кращим вибором для ситуацій, де важлива оперативність і мінімальні затримки, тоді як Fog Computing підходить для більш масштабних і розподілених систем, що потребують високої надійності та гнучкості в управлінні обчислювальними ресурсами.

Технології Edge Computing і Fog Computing відіграють важливу роль у сучасних системах медичного моніторингу, особливо в умовах, коли необхідно забезпечити високу швидкість обробки даних і мінімізувати затримки. Edge Computing дозволяє виконувати обробку даних безпосередньо на пристроях, які знаходяться біля пацієнта, що значно підвищує ефективність реагування на критичні зміни в стані здоров'я. Fog Computing, у свою чергу, забезпечує проміжну обробку на рівні локальних серверів (Fog Nodes), перш ніж дані надходять до центральної хмари. Це дозволяє зменшити навантаження на центральні сервери та покращити масштабованість системи, особливо в умовах великого обсягу даних. Приклади застосування технологій Edge Computing і Fog Computing у системах медичного моніторингу представлено в табл. 3.

Таблиця 3

Застосування технологій Edge Computing і Fog Computing у системах медичного моніторингу

Сценарій використання	Edge Computing	Fog Computing
Моніторинг пацієнтів у віддалених районах	Використання мобільних пристроїв для збору та обробки даних на місці	Обробка даних на місцевих серверах з передачею до центральної бази
Обробка зображень для діагностики	Аналіз зображень на периферійних пристроях, таких як портативні сканери	Попередня обробка на Fog Nodes перед передачею до хмарних систем для глибокого аналізу
Безперервний моніторинг життєвих показників	Миттєва реакція на зміни стану пацієнта завдяки локальній обробці	Розподілена обробка і зберігання даних для довготривалого моніторингу

Джерело: сформовано автором на підставі [3, 13, 11, 16, 18]

Зокрема, для моніторингу пацієнтів у віддалених районах Edge Computing забезпечує локальну обробку даних, що дозволяє швидко реагувати на зміни стану пацієнта без необхідності в надійних підключеннях до інтернету. Fog Computing, у свою чергу, дозволяє обробляти дані на проміжних серверах, що забезпечує більш глибокий аналіз перед передачею даних до центральної хмари. Це особливо корисно для обробки великих обсягів медичних зображень або для забезпечення довготривалого моніторингу пацієнтів з високими вимогами до надійності та зберігання даних. На рис. 1. проілюстровано архітектуру систем медичного моніторингу з використанням Edge Computing та Fog Computing.

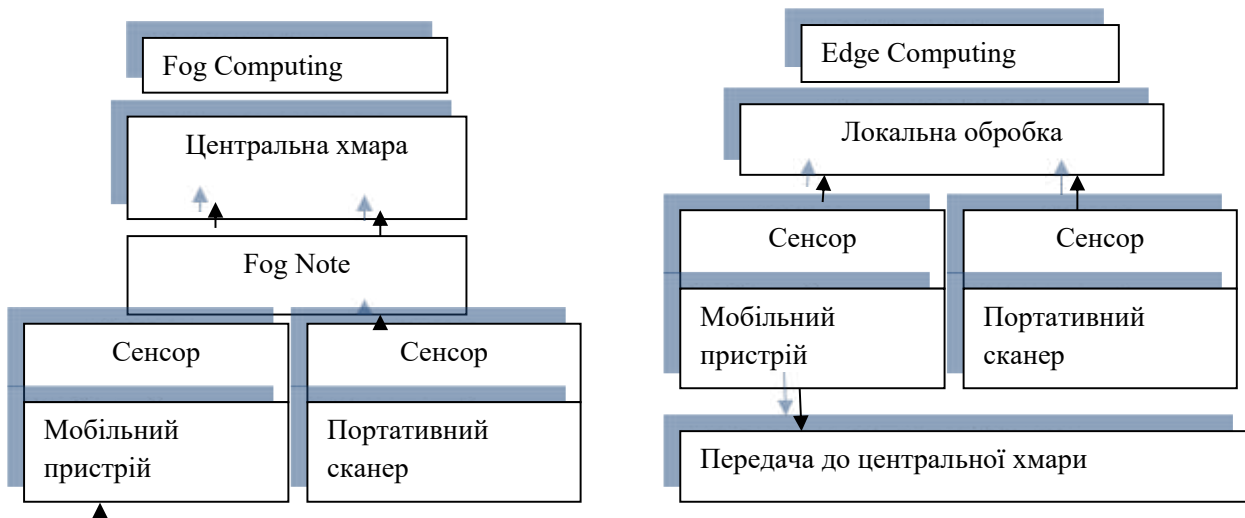


Рис. 1. Архітектура систем медичного моніторингу з використанням Fog Computing та Edge Computing

Джерело: сформовано автором

У системах медичного моніторингу на основі Edge Computing всі дані обробляються безпосередньо на периферійних пристроях, таких як сенсори або мобільні пристрої. Цей підхід забезпечує мінімальну затримку та швидку реакцію на зміни стану пацієнта, оскільки обробка даних відбувається локально. Після обробки, якщо потрібно, дані можуть бути передані до центральної хмари для подальшого зберігання або аналізу. Ця архітектура є ідеальною для ситуацій, коли важлива негайна обробка та реагування.

У випадку використання Fog Computing периферійні пристрої (Edge Devices), такі як сенсори або мобільні пристрої, збирають дані та передають їх до локальних серверів (Fog Nodes) для проміжної обробки. Потім оброблені дані можуть бути відправлені до центральної хмари для тривалого зберігання або глибокого аналізу. Цей підхід дозволяє знизити затримки, забезпечити високу надійність і масштабованість системи, що є особливо важливим для великих та розподілених медичних мереж. Однак, не можна розглядати ці технології ізольовано.

Впровадження Edge Computing та Fog Computing у медичні інфраструктури передбачає їх інтеграцію в загальну архітектуру системи, де вони доповнюють одна одну. Поєднання обох підходів дозволяє створити гнучку і надійну інфраструктуру, яка здатна адаптуватися до різних умов експлуатації [10, 12]. Наприклад, Edge Computing може забезпечувати миттєву обробку критичних даних на місцевому рівні, в той час як Fog Computing може виконувати більш комплексні завдання обробки та аналізу даних, що потребують більш значних обчислювальних ресурсів і координації між кількома вузлами.

Застосування технологій Edge Computing та Fog Computing у медичних інфраструктурах зіштовхується з різними умовами та проблемами, які впливають на їхню ефективність. Кожна з цих технологій демонструє свої переваги у певних ситуаціях, допомагаючи вирішувати специфічні задачі медичних установ. Таблиця 4 порівнює використання Edge і Fog Computing в різних умовах медичних інфраструктур, ілюструючи, як кожна технологія адаптується до цих умов та вирішує виникаючі проблеми.

Таблиця ілюструє, як Edge Computing та Fog Computing відповідають на різні виклики, що виникають у медичних інфраструктурах. Edge Computing забезпечує миттєву обробку даних на місці їх отримання, що є критичним для оперативного реагування в умовах, де затримка може коштувати життя, наприклад, в інтенсивній терапії. У випадках, коли необхідно обробляти великі обсяги даних з різних джерел, як у великих лікарнях чи медичних центрах, Fog Computing демонструє свою ефективність, розподіляючи обробку між кількома вузлами і знижуючи навантаження на центральні сервери. Обидві технології сприяють підвищенню безпеки та надійності систем, проте кожна має свої специфічні переваги в залежності від умов використання.

Щоб розробити методологію вибору між Edge Computing і Fog Computing для медичних систем моніторингу, необхідно врахувати цілий ряд факторів, які впливають на ефективність і впровадження кожної з цих технологій. Методологія повинна включати кілька ключових етапів, що дозволяють систематично оцінити і порівняти ці технології з точки зору їх застосування в медичних інфраструктурах:

Таблиця 4

Порівняння використання Edge та Fog Computing в умовах медичних інфраструктур

Умови/Проблеми використання	Edge Computing	Fog Computing
Затримка у доступі до критичної інформації	Обробка даних на місці отримання зменшує затримку, забезпечуючи швидкий доступ до критичної інформації.	Використання розподіленої обробки дозволяє знизити затримку, але менше ефективно в екстремально критичних ситуаціях.
Обмежена пропускна здатність мережі	Знижує обсяг даних, які потрібно передавати, обробляючи їх локально, що зменшує навантаження на мережу.	Залучення проміжних вузлів для часткової обробки дозволяє зменшити навантаження на центральну мережу, але не вирішує проблему повністю.
Нестабільний зв'язок між медичними пристроями і центральними серверами	Забезпечує автономну обробку даних при відсутності зв'язку з сервером, що критично в умовах відсутності стабільного інтернету.	Fog Computing знижує залежність від центральних серверів, використовуючи проміжні вузли для обробки даних, але потребує більш надійного зв'язку для координації вузлів.
Конфіденційність і безпека чутливих медичних даних	Локальна обробка знижує ризик витоку інформації, оскільки дані залишаються на периферії.	Розподілена обробка даних дозволяє додатково шифрувати і захищати дані на різних етапах, що підвищує загальну безпеку.
Інтеграція і сумісність з існуючими медичними системами	Може вимагати спеціальної адаптації для роботи з різними типами медичних пристроїв.	Більш гнучка і масштабована архітектура дозволяє легше інтегруватися з існуючими системами і забезпечити сумісність.
Обробка великих обсягів даних з різних відділень лікарні	Обмежені можливості для одночасної обробки великих масивів даних через невеликі ресурси на периферії.	Забезпечує ефективну обробку великих обсягів даних завдяки розподіленню обчислювальних задач між кількома вузлами.

Джерело: сформовано автором на підставі [7, 8, 11, 15, 16]

– Аналіз вимог – визначення специфічних потреб медичних систем, таких як швидкість обробки даних, надійність, масштабованість і інтеграція з існуючими системами.

– Оцінка технологій – використання різних методів для оцінки Edge Computing і Fog Computing в контексті їх відповідності вимогам.

– Порівняння результатів – формування комплексного порівняння, що включає як технічні, так і економічні аспекти кожної технології.

– Прийняття рішення – вибір найбільш відповідної технології на основі зібраних даних і проведеного аналізу [13, 14].

Методології вибору технологій для медичних систем моніторингу представлено в табл. 5.

Таблиця 5

Методології вибору технологій для медичних систем моніторингу

Методологія	Опис	Edge Computing	Fog Computing
Метод сценарного аналізу	Оцінка технологій через сценарії, що імітують реальні умови використання.	Сценарії для координації даних між різними медичними пристроями в мережі.	Сценарії для координації даних між різними медичними пристроями в мережі.
Метод моделювання навантаження	Оцінка продуктивності технологій в умовах різного навантаження і використання.	Оцінка швидкості і зменшення затримок при обробці даних на рівні пристроїв.	Оцінка ефективності обробки даних у розподілених вузлах при високих навантаженнях.
Метод інтеграційного аналізу	Аналіз можливості інтеграції технологій з існуючими системами та їхню гнучкість.	Інтеграція з медичними пристроями через локальні шлюзи та датчики.	Інтеграція з централізованими системами через розподілені вузли і обробка даних в хмарах.
Метод порівняння витрат і вигод	Оцінка економічної доцільності технологій з урахуванням витрат на впровадження і підтримку.	Витрати на обладнання та обслуговування локальних вузлів.	Витрати на розподілену інфраструктуру та комунікаційні витрати між вузлами.

Джерело: сформовано автором

Метод сценарного аналізу на практиці використовує моделювання реальних медичних ситуацій для перевірки, як швидко і ефективно кожна технологія може реагувати на критичні зміни в стані пацієнта: Edge Computing оцінюється за його здатністю обробляти дані локально на пристроях, а Fog Computing – за здатністю інтегрувати дані з різних пристроїв у розподіленій мережі. Метод моделювання навантаження перевіряє, як технології справляються з високими навантаженнями: для Edge Computing це включає тести на продуктивність окремих пристроїв, а для Fog Computing – оцінку обробки даних в умовах інтенсивного трафіку між вузлами. Метод інтеграційного аналізу оцінює, як кожна технологія вписується в існуючу інфраструктуру: Edge Computing перевіряється на предмет легкості інтеграції з локальними медичними пристроями, тоді як Fog Computing оцінюється за ефективністю зв'язку і координації даних між розподіленими вузлами. Метод порівняння витрат і вигод аналізує економічні аспекти впровадження: для Edge Computing враховуються витрати на локальні пристрої і їх обслуговування, тоді як для Fog Computing розглядаються витрати на розподілену інфраструктуру і комунікації між вузлами. Ці методології допомагають визначити оптимальний підхід для конкретних медичних умов, забезпечуючи ефективність, інтеграцію та економічну доцільність вибраної технології. Процес вибору найбільш підходящої технології для медичних систем представлено на рис. 2.

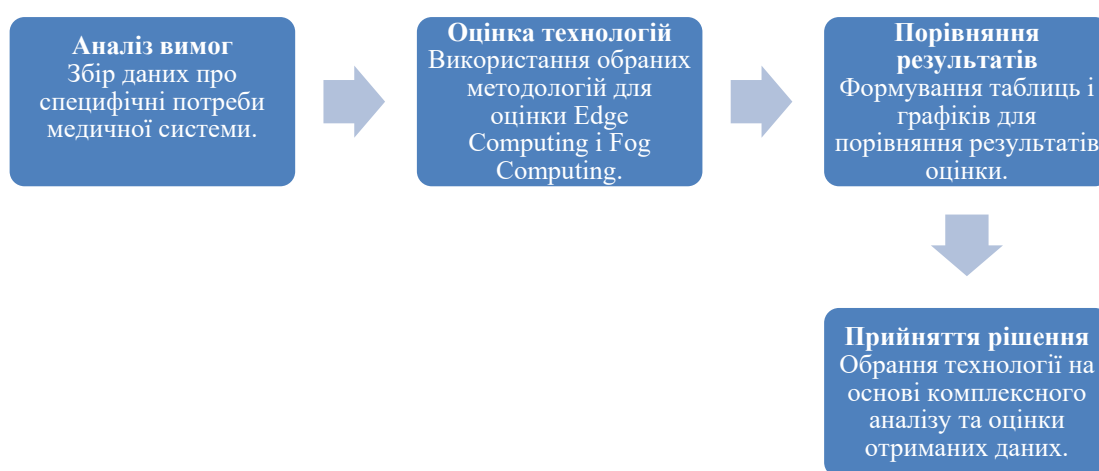


Рис. 2. Процес вибору технології для медичних систем

Джерело: сформовано автором

Схема ілюструє процес вибору найбільш підходящої технології для медичних систем. Процес починається з аналізу вимог, далі переходить до оцінки технологій за допомогою обраних методологій, потім здійснюється порівняння результатів і закінчується прийняттям обґрунтованого рішення. Це забезпечує систематичний підхід до вибору технології на основі всебічного аналізу і порівняння.

Впровадження технологій Edge Computing та Fog Computing у системи медичного моніторингу є необхідним кроком для підвищення ефективності обробки даних, зниження затримок у передачі інформації та оптимізації використання обчислювальних ресурсів. Обидва підходи спрямовані на розв'язання проблем, пов'язаних із централізованою обробкою великих обсягів даних, що є критично важливим у медичних системах, де від швидкості та точності обробки даних залежать життя пацієнтів. Вибір між Edge і Fog Computing залежить від конкретних вимог системи, ресурсних обмежень та особливостей інфраструктури медичного закладу.

Успішне впровадження технологій Edge Computing та Fog Computing у системи медичного моніторингу потребує врахування кількох важливих аспектів. По-перше, необхідно забезпечити ефективну обробку даних безпосередньо на пристроях або у найближчих до них вузлах, що дозволить знизити затримки у передачі інформації та підвищити швидкість реагування системи. По-друге, критично важливо врахувати ресурсні обмеження, зокрема енергоефективність та доступність обчислювальних потужностей, що є особливо актуальним у медичних системах, які повинні функціонувати безперебійно.

По-третє, слід зосередитися на забезпеченні високого рівня безпеки і конфіденційності даних, оскільки медична інформація є надзвичайно чутливою і вимагає надійного захисту. Також важливо забезпечити можливість масштабування системи та її гнучкість, що дозволить адаптуватися до змін у кількості підключених пристроїв та обсязі оброблюваних даних. Додатково, необхідно провести

навчання медичного персоналу для ефективного використання нових технологій і забезпечити регулярний моніторинг системи для своєчасного виявлення і виправлення можливих проблем.

У таблиці 6 запропоновано рекомендації, які враховують сучасні виклики та ресурсні обмеження при впровадженні Edge Computing та Fog Computing у системи медичного моніторингу.

Таблиця 6

Рекомендації щодо впровадження Edge та Fog Computing у системи медичного моніторингу

Напрямок	Рекомендації для Edge Computing	Рекомендації для Fog Computing
Обробка даних	Впровадження легких алгоритмів для локальної обробки на пристроях, мінімізуючи навантаження на центральні сервери.	Використання гібридних моделей обробки, що поєднують локальну обробку з передачею даних на регіональні сервери для подальшого аналізу.
Інфраструктурні ресурси	Розробка енергоефективних рішень для зменшення споживання енергії пристроями, що працюють на батареях.	Розгортання серверів ближче до кінцевих користувачів для зменшення затримок та підвищення доступності обчислювальних ресурсів.
Безпека та конфіденційність	Шифрування даних на пристроях та забезпечення безпеки при передачі інформації в реальному часі.	Впровадження багаторівневих систем безпеки з шифруванням на всіх етапах обробки та передачі даних між пристроями та серверами.
Масштабування та гнучкість	Забезпечення можливості швидкого додавання нових пристроїв без значних змін у системі.	Створення масштабованої інфраструктури, що дозволяє легко адаптуватися до збільшення кількості пристроїв та обсягу даних.
Затримка в обробці даних	Використання пристроїв з більш потужними процесорами та оптимізованими мережевими інтерфейсами для мінімізації затримок.	Забезпечення оптимального розташування серверів для мінімізації затримок у передачі даних між пристроями та серверами.
Навчання персоналу	Проведення навчальних програм для медичного персоналу щодо роботи з новими пристроями та технологіями Edge Computing.	Організація тренінгів для персоналу, акцентуючи увагу на роботі з гібридними системами обробки даних у рамках Fog Computing.
Моніторинг та оптимізація	Встановлення систем моніторингу для відстеження ефективності обробки даних на пристроях Edge Computing.	Регулярний моніторинг роботи серверів та кінцевих пристроїв з метою вчасного виявлення та виправлення можливих проблем у системі.

Джерело: сформовано автором

В умовах сучасної медицини, де швидкість і точність обробки даних безпосередньо впливають на життя пацієнтів, впровадження рекомендацій з таблиці дозволить вирішити кілька критичних проблем. По-перше, завдяки локальній обробці даних у межах Edge Computing можна значно зменшити затримки при отриманні і аналізі медичних показників, що особливо важливо у випадках, коли кожна секунда має значення. Це дозволить оперативніше реагувати на зміни в стані пацієнта, що підвищує ефективність лікування.

По-друге, оптимізація використання інфраструктурних ресурсів через розгортання Fog Computing допоможе вирішити проблему обмеженості центральних серверів та забезпечить більш рівномірний розподіл обчислювальних навантажень. Це сприятиме зниженню ризиків перевантаження системи та підвищенню її стійкості.

По-третє, впровадження багаторівневих систем безпеки дозволить знизити ризики несанкціонованого доступу до чутливих медичних даних, що є особливо актуальним у сучасних умовах зростання кіберзагроз. Також, рекомендації щодо масштабування і гнучкості систем дозволять медичним закладам легко адаптувати свої системи моніторингу до зростання кількості пацієнтів або збільшення обсягу оброблюваних даних, не втрачаючи ефективності. Алгоритм ефективного впровадження Edge та Fog Computing у системи медичного моніторингу представлено на рис. 3.

Алгоритм впровадження рекомендацій забезпечує ефективну інтеграцію Edge та Fog Computing у системи медичного моніторингу. Він дозволяє вибрати оптимальну технологію, спланувати надійну архітектуру, навчити персонал та проводити постійний моніторинг системи. Це допомагає підвищити швидкість і надійність обробки даних, забезпечити безпеку медичної інформації, та адаптувати систему до змін у навантаженні. Завдяки цьому, медичні заклади можуть оперативно реагувати на потреби пацієнтів та знижувати ризики кіберзагроз.

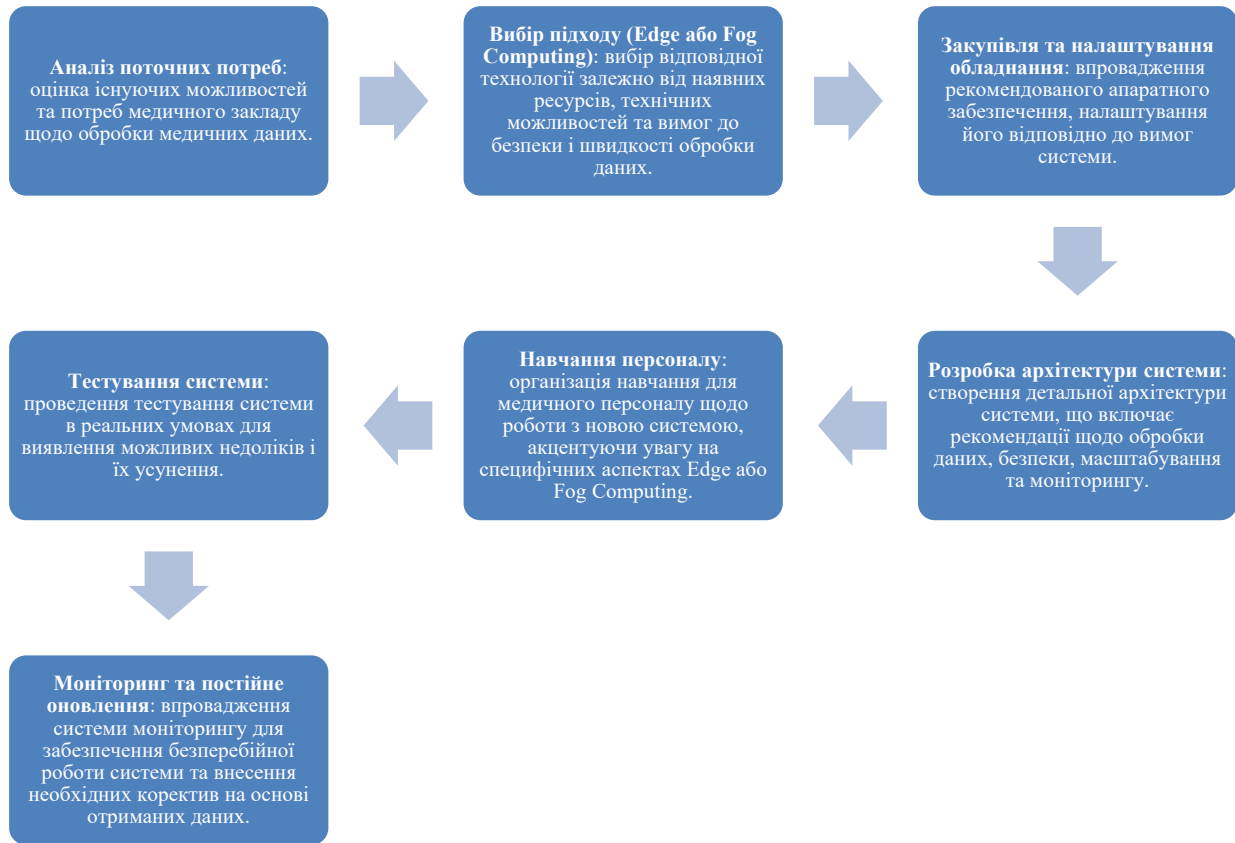


Рис. 3. Алгоритм ефективного впровадження Edge та Fog Computing у системи медичного моніторингу

Джерело: сформовано автором

Висновки даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямку. У результаті дослідження було встановлено, що технології Edge Computing та Fog Computing відіграють важливу роль у сучасних системах медичного моніторингу, забезпечуючи ефективну обробку даних, зниження затримок у передачі інформації та оптимізацію використання обчислювальних ресурсів. Основні проблеми, з якими зіштовхуються ці технології, включають забезпечення надійності систем в умовах нестабільного зв'язку, зниження енергоспоживання при обмежених ресурсах та захист конфіденційності чутливих медичних даних.

На основі проведеного порівняльного аналізу, було рекомендовано впроваджувати Edge Computing для швидкої обробки даних у критичних ситуаціях, що потребують мінімальної затримки, тоді як Fog Computing є більш доцільним для великих і розподілених систем, де важлива надійність та масштабованість.

Так, розробка методології інтеграції Edge та Fog Computing у медичні системи забезпечить гнучкість, надійність і безпеку в обробці даних. Це включає розробку нових алгоритмів обробки даних та адаптацію існуючих технологій до вимог медичних інфраструктур.

Перспективи подальших досліджень включають розробку нових моделей для аналізу даних у системах медичного моніторингу, а також вивчення можливостей інтеграції цих моделей у різні галузі медицини, що дозволить значно підвищити ефективність і надійність роботи медичних інформаційних систем.

Список використаних джерел:

1. Нестеров В. Визначення впливу методів візуалізації даних на процеси прийняття бізнес-рішень. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2024. № 1. С. 60–70. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.1.7>.
2. Al Mudawi N. Integration of IoT and fog computing in healthcare based on smart intensive units. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 59906–59918. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3179704>.
3. Alwakeel A. An overview of fog computing and edge computing security and privacy issues. *Sensors*. 2021. Vol. 21, № 24. 8226. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21248226>.

4. Aslanpour M., Gill S., Toosi A. Performance evaluation metrics for cloud, fog and edge computing: A review, taxonomy, benchmarks and standards for future research. *Internet of Things*. 2020. Vol. 12. 100273. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.iot.2020.100273>.
5. Dash S., Tripathy A., Pradhan S. K., Rath S. K. Edge and fog computing in healthcare – A review. *Scalable Computing: Practice and Experience*. 2019. Vol. 20, № 2. P. 191–206. DOI: <https://doi.org/10.12694/scpe.v20i2.1504>.
6. Dong P., Bi Y., Wang Y., Wu H., Xing X. Edge computing based healthcare systems: Enabling decentralized health monitoring in Internet of medical Things. *IEEE Network*. 2020. Vol. 34, № 5. P. 254–261. DOI: <https://doi.org/10.1109/MNET.011.1900636>.
7. Hartmann M., Hashmi U., Imran A. Edge computing in smart health care systems: Review, challenges, and research directions. *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*. 2022. Vol. 33, № 3. DOI: <https://doi.org/10.1002/ett.3710>.
8. Kumar V., Kaur M., Tomar S. Comparison of fog computing & cloud computing. *International Journal of Mathematical Sciences and Computing*. 2019. Vol. 1. P. 31–41. DOI: <https://doi.org/10.5815/ijmsc.2019.01.03>.
9. Laroui M., Taleb T., Serhrouchni A. Edge and fog computing for IoT: A survey on current research activities & future directions. *Computer Communications*. 2021. Vol. 180. P. 210–231. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2021.09.003>.
10. Mendiboure L., Chalouf M.A., Krief F. Edge computing based applications in vehicular environments: Comparative study and main issues. *Journal of Computer Science and Technology*. 2019. Vol. 34. P. 869–886. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11390-019-1947-3>.
11. Muneeb M., Ko K.-M., Park Y.-H. A fog computing architecture with multi-layer for computing-intensive IoT applications. *Applied Sciences*. 2021. Vol. 11, № 24. 11585. DOI: <https://doi.org/10.3390/app112411585>.
12. Mutlag A., Ghani I., Arunkumar N., Mohammed M., Baker T. Enabling technologies for fog computing in healthcare IoT systems. *Future Generation Computer Systems*. 2019. Vol. 90. P. 62–78. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.future.2018.07.049>.
13. Prasad V. K., Bhavsar M. D., Tanwar S. Influence of monitoring: Fog and edge computing. *Scalable Computing: Practice and Experience*. 2019. Vol. 20, № 2. P. 365–376. DOI: <https://doi.org/10.12694/scpe.v20i2.1533>.
14. Rajavel R., Ravichandran S.K., Harimoorthy K., et al. IoT-based smart healthcare video surveillance system using edge computing. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2022. Vol. 13. P. 3195–3207. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-021-0>
15. Ray P., Dash D., De D. Edge computing for Internet of Things: A survey, e-healthcare case study and future direction. *Journal of Network and Computer Applications*. 2019. Vol. 140. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2019.05.005>.
16. Seljakanmani S., Sumathi M. Fuzzy assisted fog and cloud computing with MIoT system for performance analysis of health surveillance system. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*. 2021. Vol. 12, № 3. P. 3423–3436. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12652-020-02156-y>.
17. Shakarami A., Mahmud R., Kochanski M., Buyya R. Resource provisioning in edge/fog computing: A comprehensive and systematic review. *Journal of Systems Architecture*. 2022. Vol. 122. 102362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sysarc.2021.102362>.
18. Singh S.P., Taneja M., Davy A. Fog computing: from architecture to edge computing and big data processing. *The Journal of Supercomputing*. 2019. Vol. 75. P. 2070–2105. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11227-018-2701-2>.

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
ТА СУСПІЛЬСТВО**

**INFORMATION TECHNOLOGY
AND SOCIETY**

ВИПУСК 3 (14)

ISSUE 3 (14)

2024

Коректура

Ірина Чудеснова

Комп'ютерна верстка

Наталія Кузнецова

Формат 60x84/8. Гарнітура Cambria.

Папір офсет. Цифровий друк.

Підписано до друку 31.10.2024.

Ум. друк. арк. 6,28. Замов. № 1224/837. Наклад 300 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, Україна, м. Одеса, вул. Інглєзі, 6/1

Телефон +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК No 7623 від 22.06.2022 р.