Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

ВІСНИК

Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

Серія
«Математичне моделювання.
Інформаційні технології.
Автоматизовані системи управління»

Випуск 65

Серія заснована 2003 р.

BULLETIN

of V.N. Karazin Kharkiv National University

Series
«Mathematical Modeling.
Information Technology.
Automated Control Systems»

Issue 65

First published in 2003

Харків
2025

Засновник журналу Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, Харків, Україна. Рік заснування 2003. Періодичність: 4 випуски на рік. https://periodicals.karazin.ua/mia

Статті містять дослідження у галузі математичного моделювання та обчислювальних методів, інформаційних технологій, захисту інформації. Висвітлюються нові математичні методи дослідження та керування фізичними, технічними та інформаційними процесами, дослідження з програмування та комп'ютерного моделювання в наукоємних технологіях.

Для викладачів, наукових працівників, аспірантів, працюючих у відповідних або суміжних напрямках.

Наказом Міністерства освіти і науки України від 17.03.2020 № 409 наукове фахове періодичне видання Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління» включено до Категорії «Б» Переліку наукових фахових видань України за наступними спеціальностями: 113 – Прикладна математика;122 – Комп'ютерні науки та інформаційні технології; 123 – Комп'ютерна інженерія; 125 – Кібербезпека.

Затверджено до друку рішенням Вченої ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 12 від 25.04.2025 р.)

Редакційна колегія:

Азарєнков М.О. (гол. редактор), д.ф.-м.н., академік НАН України, проф., ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Жолткевич Г.М. (заст. гол. редактора), д.т.н., проф. ФМІ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Лазурик В.Т. (заст. гол. редактора), д.ф.-м.н., проф., ФКН ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Споров О.Є. (відповідальний секретар), к.ф.-м.н., доц. ФКН ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Замула О. А., д.т.н., доц., ФКН ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Золотарьов В.О., д.ф.-м.н., проф., ФТІНТ імені Б.І. Веркіна НАН України

Куклін В.М., д.ф.-м.н., проф., ФКН ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Мацевитий Ю.М., д.т.н., академік НАН України, проф., фізико-енергетичний ф-т ХНУ імені В.Н. Каразіна

Рассомахін С. Г., д.т.н., доц., ФКН ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Стєрвоєдов М.Г., к.т.н., доц., ФКН ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Толстолузька О. Г. д.т.н.,с.н.с., доц., ФКН ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Ткачук М. В, д.т.н., проф., ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Шейко Т.І., д.т.н., проф., фізико-енергетичний ф-т ХНУ імені В.Н. Каразіна

Шматков С. І., д.т.н., проф., ФКН ІВТ ХНУ імені В.Н. Каразіна

Раскін Л.Г., д.т.н., проф., Національний технічний університет "ХПІ"

Стрельнікова О.О., д.т.н., проф. Ін-т проблем машинобудування НАН України

Соколов О.Ю., д.т.н., проф., кафедра прикладної інформатики, університет імені Миколая Коперника, м. Торунь (Польща)

Prof. **Harald Richter**, Dr.-Ing., Dr. rer. nat. habil. Professor of Technical Informatics and Computer Systems, Institute of Informatics, Technical University of Clausthal, Germany

Prof. **Philippe Lahire**, Dr. habil., Professor of computer science, Dep. of C. S., University of Nice-Sophia Antipolis, France

Адреса редакційної колегії: 61022, м. Харків, майдан Свободи, 6, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, к. 534. Тел. +380 (57) 705-42-81, Email: journal-mia@karazin.ua.

Мова публікації: українська, англійська.

Статті пройшли внутрішнє та зовнішнє рецензування.

Ідентифікатор медіа у Реєстрі суб'єктів у сфері медіа: R30-04456
(Рішення № 1538 від 09.05.2024 р Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення. Протокол № 15)

© Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, оформлення, 2025

The founder of the Journal is V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, Ukraine.
Year of foundation 2003. The journal is published four times a year.
https://periodicals.karazin.ua/mia

The articles are present research in the field of mathematical modeling and computing methods, information technologies, information security. New mathematical methods of research and management of physical, technical and information processes, research on programming and computer modeling in science-intensive technologies are covered.

For teachers, researchers, graduate students working in relevant or related fields.

By the order of the Ministry of Education and Science of Ukraine from 17.03.2020 № 409 scientific professional periodical Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University series "Mathematical modeling. Information Technologies. Automated control systems" is included in Category "B" of the List of scientific professional publications of Ukraine in the following specialties: 113 – Applied Mathematics, 122 – Computer Science and Information Technology; 123 – Computer engineering; 125 – Cybersecurity.

Approved for publication by the decision of the Academic Council of V.N. Karazin Kharkiv National University (Minutes № 12 of 25.04.2025).

Editorial Board:

Azarenkov M.O. (Chief Editor), Acad. Of the NAS of Ukraine, Dr. Sc., Prof., HTI V.N. Karazin Kharkiv National University
Zholtkevich G.M. (Deputy Editor), Dr. Sc, Prof. MCS V.N. Karazin Kharkiv National University
Lazurik V.T. (Deputy Editor), Dr. Sc, Prof. CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University
Sporov O.E., (Executive Secretary), Ph.D. Assoc. Prof, CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University
Zamula A.A., Ph.D. Assoc. Prof, CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University
Zolotarev V.A., Dr. Sc, Prof. B. Verkin Institute for Low Temperature Physics and Engineering of the National Academy of Sciences of Ukraine
Kuklin V.M., Dr. Sc, Prof. CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University
Matsevity Yu.M., Acad. Of the NAS of Ukraine, Dr. Sc., Prof., DPE V.N. Karazin Kharkiv National University
Rassomakhin S.G., Dr. Sc, Prof. CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University
Styervoyedov N.G., Ph.D. Assoc. Prof, CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University
Tolstoluzka O.G., Dr. Sc, Assoc. Prof. CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University
Tkachuk M.V., Dr. Sc, Prof. HTI V.N. Karazin Kharkiv National University
Sheyko T.I., Dr. Sc, Prof. DPE V.N. Karazin Kharkiv National University
Shmatkov S.I., Dr. Sc, Prof. CSD HTI V.N. Karazin Kharkiv National University
Raskin L.G., Dr. Sc, Prof. National Technical University "Kharkiv Polytechnic institute"
Strelnikova E.A., Dr. Sc, Prof., NASU A. Pidgorny Institute of Engineering Problems
Sokołov O.Yu., Dr. Sc, Prof. Nicolaus Copernicus University, Torun, Poland
Prof. **Harald Richter**, Dr.-Ing., Dr. rer. nat. habil. Professor of Technical Informatics and Computer Systems, Institute of Informatics, Technical University of Clausthal, Germany
Prof. **Philippe Lahire**, Dr. habil., Professor of computer science, Dep. of C. S., University of Nice-Sophia Antipolis, France

Editorial Address: 61022, Kharkiv, Svobodi sq., 6, V.N. Karazin Kharkiv National University, r. 534. Phone. +380 (57) 705-42-81, Email: journal-mia@karazin.ua.

Language of publication: Ukrainian, English.

The articles pass internal and external review.

Certificate of state registration: KV № 21578-11478P dated 18.08.2015

Media identifier in the Register of the field of Media Entities: R30-04456
(Decision № 1538 dated May 9, 2024 of the National Council of Television and Radio Broadcasting of Ukraine, Protocol № 15)

© V.N. Karazin Kharkiv National University, 2025

ЗМІСТ

▪ **Бакуменко Н. С., Румянцев Д. М.** **6**
Аналіз та прогнозування злочинності за допомогою методів машинного навчання

▪ **Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Винокурова Н. Д.** **14**
Інтелектуальна система моніторингу температурного режиму першого контуру енергоблоку атомної електростанції на основі фрактально-кластерного аналізу

▪ **Кісельова О.М., Кузенков О. О.** **33**
Про динамічну задачу оптимального розбиття множин з відшуканням координат центрів підмножин

▪ **Лисицький К. Є., Солдатенко Д. С.** **46**
Моделювання структури ролей в системі управління проєктними завданнями.

▪ **Лупандін А. В., Хруслов М. М., Копєйкін В. В.** **57**
Проєктування та перспективи створення спеціалізованої gsm-бібліотеки для micropython у проєктах NB-IoT

▪ **Мірошник М. А., Шматков С. І., Стрілець В. Є., Зац О. Д.** **67**
Дослідження комп'ютерних систем для виявлення вторгнень та мережевих аномалій

▪ **Омельченко І. В., Струков В. М.** **83**
Дослідження впливу мовних інструкцій на якість роботи програмного агента в віртуальному середовищі

▪ **Рева С. М., Циблієв Д. О.** **92**
Комп'ютерне моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією

▪ **Яровенко В. В.** **102**
Підвищення точності визначення координат цілі в автоматизованій акустичній системі шляхом аналізу часових характеристик сигналу

CONTENTS

▪ **Bakumenko N., Rumiantsev D.** **6**
Crime analysis and prediction using machine learning methods

▪ **Brovko K., Budanov P., Vynokurova N.** **14**
Intelligent system for monitoring the temperature regime of the primary circuit of a nuclear power plant power unit based on fractal-cluster analysis

▪ **Kiseleva E., Kuzenkov O.** **33**
On the Dynamic Problem of Optimal Set Partitioning with Determination of Subset Center Coordinates

▪ **Lysytskyi K., Soldatenko D.** **46**
Modeling the structure of roles in a project task management system

▪ **Lupandin A., Khruslov M., Kopieikin V.** **57**
Design and Prospects for Developing a Modular GSM Library for MicroPython with NB-IoT Support

▪ **Miroshnyk M., Shmatkov S., Strilets V., Zats O.** **67**
Investigation of computer systems to detect intrusions and network anomalies

▪ **Omelchenko I., Strukov V.** **83**
On the impact of prompts on agent performance in a virtual environment

▪ **Reva S., Tsybliyev D.** **92**
Computer modeling of spectrometric signals with increased detailing

▪ **Yarovenko V.** **102**
Improving the Accuracy of Target Coordinate Estimation in an Automated Acoustic System through Temporal Characteristics Analysis

DOI: https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-01

УДК (UDC) 004.62

Бакуменко Ніна Станіславівна — *к.т.н., доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та робототехніки, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків-22, Україна, 61022; e-mail: n.bakumenko@karazin.ua;* **https://orcid.org/0000-0003-3496-7167**

Румянцев Данило Максимович — *студент; Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків-22, Україна, 61022; e-mail:* danylo.rumiantsev@gmail.com*;* **https://orcid.org/0009-0001-7502-8636**

Аналіз та прогнозування злочинності за допомогою методів машинного навчання

Актуальність. У зв'язку з розвитком галузі штучного інтелекту та збільшенням потужності комп'ютерів, з'являється інтерес щодо використання методів машинного навчання для вирішення складних для людей задач. Однією із цих задач є прогнозування злочинності, яке має великий потенціал для покращення людського життя. Завдяки алгоритмам машинного навчання, таким як дерева рішень або випадкові ліси, можна визначати тенденції розвитку злочинності, приховані закономірності та виявляти чинники злочинної діяльності.
Мета. Мета даної статті полягає в аналізі ефективності використання методів машинного навчання, таких як лінійна регресія, дерева рішень, алгоритм k-найближчих сусідів та нейронні мережі для аналізу та прогнозування злочинності.
Методи дослідження. Порівняльний аналіз, експеримент.
Результати. Проведено аналіз ефективності різних методів машинного навчання (лінійна регресія, регресія Ласо, гребнева регресія, регресія k-найближчих сусідів, дерева рішень та модель радіально-базисних нейронних мереж) для аналізу та прогнозування злочинності. Серед розглянутих методів машинного навчання найкращі характеристики показали регресія k-найближчих сусідів та модель радіально-базисних нейронних мереж.
Висновки. Проведений аналіз підтверджує необхідність здійснення довгострокового та оперативного аналізу статистичної інформації з подальшим прогнозуванням факторів та чинників, які впливають на показники злочинності, методами машинного навчання. Отримані результати можуть допомогти у вивченні проблеми аналізу впливу на злочинність соціальних, демографічних чинників, що дозволить планувати профілактичні заходи, розподіляти ресурси правоохоронних органів більш ефективно та ін.

Ключові слова: *методи машинного навчання, прогнозування злочинності, лінійна регресія, регресія Ласо, гребнева регресія, дерева рішень, метод k-найближчих сусідів, нейронні мережі.*

Як цитувати: Бакуменко Н. С., Румянцев Д. М. Аналіз та прогнозування злочинності за допомогою методів машинного навчання. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2025. вип. 65. С.6-13. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-01

How to quote: Bakumenko N. S., Rumiantsev D. M. "Crime analysis and prediction using machine learning methods". *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modeling. Information Technology. Automated control systems.* vol. 64. pp. 6-13. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-01 [in Ukrainian]

1 Вступ

Прогнозування злочинності є важливим інструментом для правоохоронних органів, який дозволяє оцінювати ефективність роботи, планувати заходи запобігання злочинності, розробляти стратегії протидії тощо. Наявність великих обсягів даних, які надаються деякими державними органами у відкритий доступ, пригортає увагу дослідників до цієї галузі і спричиняє збільшення кількості публікацій на цю тему останніми роками [1]. Використання методів штучного інтелекту та машинного навчання для обробки статистичних, демографічних даних дозволяє аналізувати великі обсяги даних з метою виявлення закономірностей, виявлення чинників та передбачення злочинної діяльності [2].

© Бакуменко Н.С., Румянцев Д.М., 2025
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

У даній статті методи машинного навчання, зокрема регресійні моделі різних типів, розглядаються з метою порівняння ефективності цих методів для аналізу та прогнозування злочинності за статистичними та демографічними показниками.

2 Аналіз літературних джерел та постановка задачі

Методи машинного навчання та інтелектуального аналізу даних активно використовується для обробки великих масивів даних в різних галузях людської практики, зокрема в аналізі та прогнозуванні злочинності [3]. В роботі [4] наведений детальний огляд проблем та факторів, які виникають при прогнозуванні злочинів, і запропонований алгоритм K-найближчих сусідів для прогнозування злочинності у Ванкувері. Geetha Vadav та ін. в роботі [5] серед алгоритмів на основі дерев рішень, SVM, K-найближчих сусідів та випадкових лісів показали, що останній є найбільш ефективним в задачах прогнозування злочинності. В роботі [6] для прогнозування злочинності в Індії було запропоновано поєднання різних методів машинного навчання. Прикладом використання нейронних мереж для прогнозування злочинності може стати стаття [7], у якій одна з моделей нейронних мереж визначала місце злочину в межах сусіднього поштового індексу у 31,2% випадків, коли місце злочину було одразу невідомо. Наприкінці статті автор спонукає до подальшого вивчення використання нейронних мереж для прогнозу злочинності, особливо при використанні певних додаткових ознак для покращення прогнозів. В роботі [8] розглядається використання нейронних мереж в таких задачах, але з акцентом на необхідність можливості прозорої інтерпретації результатів моделювання в сфері аналізу злочинності.

В розглянутих джерелах аналіз та прогнозування злочинності було здійснено на підставі моделей класифікації. В даній роботі досліджується можливість побудови моделі для прогнозування показників злочинності у вигляді кількісних показників, яка дозволяла б оцінювати вплив окремих чинників на результат та надавала б просту інтерпретацію результатів, в класі регресійних моделей. Регресійний аналіз є фундаментальною концепцією в галузі машинного навчання і належить до методів контрольованого навчання, у якому алгоритм навчається як з вхідними значеннями, так і з вихідними мітками. Регресія в машинному навчанні складається з математичних методів, які дозволяють дослідникам даних передбачити безперервний результат (y) на основі значення однієї або кількох змінних предиктора (x). Це допомагає встановити зв'язок між змінними, оцінюючи, як одна змінна впливає на іншу.

3 Використання регресійного аналізу для прогнозування злочинності

Регресійний аналіз – це статистичний метод, який використовується для вивчення зв'язку між залежною змінною та однією або кількома незалежними змінними [9]. Він використовується для різних цілей, зокрема:

- Прогнозування: регресійний аналіз можна використовувати для прогнозування майбутніх тенденцій на основі історичних даних.
- Перевірка гіпотез: регресійний аналіз можна використовувати для перевірки гіпотез про зв'язок між залежною та незалежною змінними.
- Контрольні змінні: регресійний аналіз можна використовувати для контролю інших змінних, які можуть впливати на зв'язок між залежними та незалежними змінними.

3.1 Лінійна регресія

Лінійна регресія надає рівняння залежності змінної-результату від пояснювальних змінних у вигляді лінійної моделі:

$$y = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + ... + \hat{\beta}_p x_p$$

де $x_1, x_2, \ldots, x_p$ – незалежні змінні (вхідні змінні),

y – залежна змінна (вихід),

$\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, ..., \hat{\beta}_p$ – коефіцієнти рівняння регресії, параметри моделі.

Лінійні моделі припускають лінійний зв'язок між залежною змінною та незалежними змінними. Це припущення може бути обмеженим, особливо коли зв'язок між змінними не є лінійним. Нелінійні зв'язки часто є складнішими і можуть вимагати більш складних моделей, щоб вловити їхні нюанси.

- Моделі лінійної регресії чутливі до викидів. Викиди можуть впливати на нахил і перетин лінії регресії, що призводить до неточних прогнозів, тому важливо ідентифікувати викиди та відповідним чином обробляти їх.
- Моделі лінійної регресії припускають, що зв'язок між залежною змінною та незалежними змінними є лінійним. У деяких випадках це припущення може не відповідати дійсності, що призводить до неточних прогнозів.
- Моделі лінійної регресії схильні до перенавчання, особливо коли кількість незалежних змінних велика порівняно з розміром вибірки.
- Моделі регресії припускають, що незалежні змінні не сильно корельовані одна з одною.
- Моделі регресії не можуть безпосередньо обробляти категоріальні змінні.
- Моделі регресії припускають, що дисперсія залежної змінної постійна на всіх рівнях незалежних змінних. На практиці це припущення може не відповідати дійсності, що призводить до неточних прогнозів.

Загалом, регресійний аналіз є корисним інструментом для аналізу та розуміння зв'язку між змінними, а також для прогнозування та прийняття обґрунтованих рішень на основі цього зв'язку, але слід пам'ятати про його недоліки при побудові моделей.

3.2 Рідж та Ласо регресія

Регресія ласо, також відома як регулярізація L1, є формою регуляризації моделей лінійної регресії. Регулярізація – це статистичний метод для зменшення помилок, викликаних перенавчанням. Регресія Лассо додаває до функції втрат при навчання моделі штрафну змінну – суму модулей коефіцієнтів, до залишкової суми квадратів (RSS), яка потім множиться на параметр регуляризації λ, який контролює ступінь застосованої регулярізації:

$$S(\hat{\vec{\beta}}) = \sum_{i=1}^{n}(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i1} + \hat{\beta}_2 x_{i2} + \ldots + \hat{\beta}_p x_{ip} - y_i)^2 + \lambda \sum_{j=1}^{p}\left|\hat{\beta}_j\right|$$

Більші значення параметра збільшують штраф, скорочуючи більше коефіцієнтів до нуля; що може зменшити важливість (або взагалі виключити) деякі чинники з моделі. І навпаки, менші значення параметра регуляризації λ зменшують ефект штрафу, зберігаючи більше функцій у моделі.

Гребнева регресія в якості штрафу використовує суму квадратів коефіцієнтів моделі:

$$S(\hat{\vec{\beta}}) = \sum_{i=1}^{n}(\hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_{i1} + \hat{\beta}_2 x_{i2} + \ldots + \hat{\beta}_p x_{ip} - y_i)^2 + \lambda \sum_{j=1}^{p}\hat{\beta}_j^2$$

Тут λ також є параметром регуляризації,

3.3 Метод K-найближчих сусідів (КНС)

Регресія K-найближчих сусідів (КНС) – це непараметричний алгоритм машинного навчання, який можна використовувати як для завдань класифікації, так і для регресії [10]. Цей алгоритм робить прогнози, знаходячи k найближчих точок даних до заданого вхідного сигналу та усереднюючи їхні цільові значення (для числової регресії).

Ключовими параметрами методу КНС є:

1. Кількість сусідів (k): кількість найближчих сусідів k, які використовуватимуться для створення прогнозів. Маленьке k може призвести до шумних прогнозів, тоді як велике k може призвести до надмірно згладжених прогнозів.
2. Метрика відстані: КНС покладається на метрику відстані для вимірювання подібності між точками даних. Залежно від природи даних можна використовувати різні показники відстані.

Для кожної нової точки вхідних даних КНС обчислює відстань між цією точкою та всіма іншими точками даних у наборі даних. Потім він вибирає k точок даних з найменшими відстанями. Прогнозом регресії є середнє значення цільової функції k найближчих сусідів. Це може бути просте середнє арифметичне.

Регресію КНС легко реалізувати та зрозуміти, але вона може бути дорогою з точки зору обчислень, особливо для великих наборів даних, оскільки вимагає обчислення відстані між

новою точкою даних і всіма існуючими точками даних. Крім того, вибір правильного значення k і відповідної метрики відстані може вплинути на якість прогнозів.

3.4 Регресія дерева рішень (Decision Tree Regression)

Регресія дерева рішень – це метод машинного навчання, який створює деревоподібну модель для прогнозування безперервних числових значень [11]. Дерева рішень можуть фіксувати нелінійні зв'язки між змінними, не вимагаючи явних перетворень або припущень. На дерева рішень менше впливають викиди порівняно з іншими моделями регресії, а також можуть обробляти відсутні значення шляхом автоматичного розгляду альтернативних гілок на основі доступних даних.

3.5 Радіально-базисні нейронні мережі.

Радіально-базисні нейронні мережі (РБНМ) – це особливий клас прямої нейронної мережі, що складається з трьох рівнів: вхідного, прихованого та вихідного [12]. Перетворення від вхідного шару до прихованого є нелінійним, а від прихованого до вихідного – лінійним. З кожним прихованим нейроном пов'язана радіально-базисна виду

$$\phi_i(\|x-u_i\|)=\exp\left(-\frac{1}{2\sigma_i^2}\|x-u_i\|^2\right)$$

де u_i – центр функції, σ_i – її ширина.

Вихід нейронної мережі розраховується за формулою

$$y=\sum_{i=1}^{p} w_i\phi_i(\|x-u_i\|)$$

де w_i – ваги вихідного шару. центр функції.

Архітектура радіально-базисної нейронної мережі зображена на рис. 1.

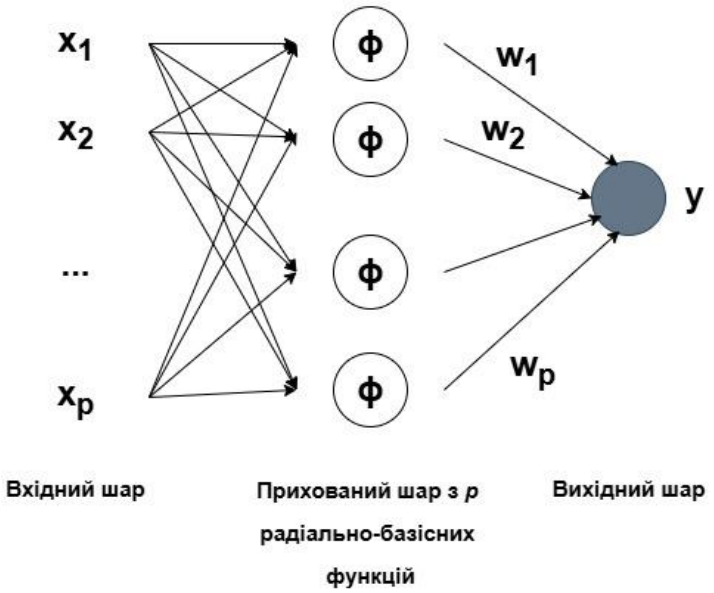


Рисунок 1. Архітектура РБНМ.
Fig. 1. Archtecture of RBNN (Radial Basis NeuralNetwork)

Вхідний рівень складається з одного нейрона для кожної змінної предиктора. Вхідні нейрони передають значення кожному нейрону прихованого шару. Прихований шар містить змінну кількість нейронів (ідеальна кількість визначається процесом навчання). Кожен нейрон містить радіальну базисну функцію з центром у точці. Коли вектор x вхідних значень подається з вхідного рівня, прихований нейрон обчислює евклідову відстань між тестовим випадком і центральною точкою нейрона. Потім він застосовує функцію ядра (радіально-базисну функцію).

Отримане значення надходить до рівня підсумовування: значення, отримане з прихованого шару, множиться на вагу, пов'язану з нейроном. Отримана сума є виходом мережі.

4 Тестовий набір даних

Для тестування роботи моделей було використано набір даних «Communities in the US» [13], який містить у собі соціально-економічні дані з перепису 1990 року, дані правоохоронних органів з опитування щодо управління правоохоронними органами та адміністративної статистики 1990 року та дані злочинності з ФБР 1995 року. Цей набір даних містить 147 атрибутів і 2216 екземплярів і також має у собі пропущені значення. Розглянемо цільові атрибути даного датасету:

Таблиця 1. Цільові атрибути Communities in the US
Table 1. Target attributes of Communities in the US

Назва змінної	Тип	Пропущені змінні	Опис
population	Integer	ні	Громадське населення
agePct12t29	Continuous	ні	Відсоток населення віком 12-29 років
numbUrban	Integer	ні	Кількість людей, які проживають у районах, класифікованих як міські
pctUrban	Continuous	ні	Відсоток населення, яке проживає у районах, класифікованих як міські
medIncome	Integer	ні	Середній дохід домогосподарства
pctWInvInc	Continuous	ні	Відсоток домогосподарств з інвестиційним/рентним доходом у 1989 році
pctWSocSec	Continuous	ні	Відсоток домогосподарств із доходом соціального забезпечення у 1989 році
pctWPubAsst	Continuous	ні	Відсоток домогосподарств із доходом від державної допомоги у 1989 році
medFamInc	Integer	ні	Середній дохід сім'ї
NumUnderPov	Integer	ні	Кількість людей, які перебувають за межею бідності
PctPopUnderPov	Continuous	ні	Відсоток населення, яке перебуває за межею бідності
PctLess9thGrade	Continuous	ні	Відсоток людей віком від 25 років, які мають освіту менше 9 класів
PctNotHSGrad	Continuous	ні	Відсоток людей віком від 25 років, які не є випускниками середньої школи
PctBSorMore	Continuous	ні	Відсоток людей віком від 25 років, які мають ступінь бакалавра або вищу освіту
PctUnemployed	Continuous	ні	Відсоток людей віком від 16 років, які входять до робочої сили та безробітних
PctEmploy	Continuous	ні	Відсоток працевлаштованих осіб віком від 16 років
PctOccupManu	Continuous	ні	Відсоток людей віком від 16 років, які зайняті у виробництві
PctOccupMgmtProf	Continuous	ні	Відсоток людей віком від 16 років, які зайняті на керівних або професійних посадах
Murders	Integer	ні	Кількість вбивств у 1995 р.
murdPerPop	Continuous	ні	Кількість вбивств на 100 тис. населення
Rapes	Integer	так	Кількість зґвалтувань у 1995 р.
rapesPerPop	Continuous	так	Кількість зґвалтувань на 100 тис. населення
Robberies	Integer	так	Кількість пограбувань у 1995 р.
robbbPerPop	Continuous	так	Кількість пограбувань на 100 тис. населення
Assaults	Integer	так	Кількість нападів у 1995 році
assaultPerPop	Continuous	так	Кількість нападів на 100 тис. населення

Burglaries	Integer	так	Кількість крадіжок зі зломом у 1995 році
burglPerPop	Continuous	так	Кількість крадіжок зі зломом на 100 тис. населення
Larcenies	Integer	так	Кількість крадіжок у 1995 році
larcPerPop	Continuous	так	Кількість крадіжок на 100 тис. населення
autoTheft	Integer	ні	Кількість крадіжок автомобілів у 1995 році
autoTheftPerPop	Continuous	ні	Кількість крадіжок автомобілів на 100 тис. населення
Arsons	Integer	так	Кількість підпалів у 1995 р.
arsonsPerPop	Continuous	так	Кількість підпалів на 100 тис. населення
violentPerPop	Continuous	так	Загальна кількість насильницьких злочинів на 100 тис. населення
nonViolPerPop	Continuous	так	Загальна кількість ненасильницьких злочинів на 100 тис. населення

Оскільки набір даних містив пропущені значення, була виконана обробка пропущених значень шляхом заміни їх на медіанні значення. Також була здійснена нормалізація змінних та поділ вибірки на тестову та навчальну в пропорції 70% – тренувальні дані, 30% – тестові.

Для побудови моделі залежності кількості вбивств *Y* вули використані змінні population, agePct12t29, numbUrban, pctUrban, medIncome, pctWInvInc, pctWSocSec, pctWPubAsst, medFamInc, NumUnderPov, PctPopUnderPov, PctLess9thGrade, PctNotHSGrad, PctBSorMore, PctUnemployed, PctEmploy, PctOccupManu, PctOccupMgmtProf, які показали найбільшу кореляцію з цільовою змінною.

5 Оцінка точності прогнозуванння для різних методів регресії

Модель лінійної регресії показала точність 0,96 для тренувального набору і 0,93 для тестового набору. Майже такі ж самі результати були отримані за допомогою гребеневої регресії (точність 0,959 для тренувального набору і 0,927 для тестового набору) і лассо регресії (0,958 для тренувального набору і 0,923 для тестового набору). Для моделі k-найближчих сусідів було отримано ь 0,705 для тренувального набору і 0,74 для тестового набору. Модель випадкових лісів показала кращі результати - точність 1,0 для тренувального набору і 0,871 для тестового набору. Результати на тренувальному наборі можуть свідчити про перенавчання моделі, хоча на тестових точність більш реалістична. Після проведених експериментів було проведено налаштування параметрів моделей за допомогою крос-валідації. Порівняння точності прогнозування для різних моделей наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Порівняння результатів роботи моделей
Table 2. Comparison of models performances

Модель	Точність на тренувальному наборі	Точність на тестовому наборі
Linear Regression (default)	0,96	0,93
Ridge Regression (default) (λ = 1.0)	0,959	0,927
Ridge Regression (best) (λ = 0.001)	0,96	0,93
Lasso Regression (default) (λ = 1.0, max_iter=1000)	0,953	0,928
Lasso Regression (best) (λ = 0.1, max_iter=10000)	0,959	0,93
K-nn Regression (default) (n_neighbors=5)	0,705	0,74
K-nn Regression (best) (n_neighbors=2)	0,934	0,832
РБНМ	-0,06	0,03

6 Висновки

У даному дослідженні проведено аналіз ефективності використання різних регресійних методів, зокрема лінійна регресія, дерева рішень, випадкові ліси, алгоритм k-найближчих сусідів та радіально-базисні нейронні мережі для аналізу та прогнозування злочинності. Тестування моделей було виконано на наборі даних «Communities in the US».

Результати дослідження показали, що метод k-найближчих сусідів, після підбору найкращих параметрів шляхом крос-валідації, надає найбільш точний прогноз порівняно з іншими обраними методами. У той же час, модель радіально-базисних нейронних мереж показала низьку похибку при тестуванні, і, теоретично, у задачах коли необхідна велика гнучкість, може перевершити метод k-найближчих сусідів.

Таким чином, вибір методу машинного навчання для аналізу та прогнозування злочинності залежить від конкретних вимог від користувача. Якщо пріоритетом є точність прогнозу, k-найближчих сусідів надає найбільш реалістичні прогнози.

Отже, результати дослідження підтверджують доцільність використання методів машинного навчання для аналізу та прогнозування злочинності та дозволяють зробити обґрунтований вибір алгоритму залежно від специфічних вимог.

REFERENCES

1. Crime Analysis Through Machine Learning / S. Kim ta in. IEEE 9th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON). Canada: Vancouver, BC. 2018. PP. 415–420. URL: https://doi.org/10.1109/IEMCON.2018.8614828.

2. Jenga K., Catal C., Kar G. Machine learning in crime prediction. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing. 2023. Vol. 14. PP. 1–27. URL: https://www.researchgate.net/publication/368164162_Machine_learning_in_crime_prediction (access date: 19.03.2025).

3. Crime data mining: a general framework and some examples / H. Chen та ін. *IEEE Computer*. 2004. Vol 37, No 4, PP. 50–56. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/1297301 (дата звернення: 19.03.2025).

4. Crime Prediction Using Machine Learning and Deep Learning: A Systematic Review and Future Directions / V. Mandalapu та ін. *IEEE Access*. 2023. Vol. 11. PP. 60153–60170. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/10151873 (access date: 19.03.2025)

5. The Role of Machine Learning in Crime Analysis and Prediction / M. Geetha Vadav et al. *2024 International Conference on Expert Clouds and Applications (ICOECA), Bengaluru, India,*. 2024. Vol. 2024 International Conference on Expert Clouds and Applications (ICOECA), Bengaluru, India, 2024. P. 885–890. URL: https://doi.org/10.1109/ICOECA62351.2024.0015 .

6. Advancing Crime Analysis and Prediction: A Comprehensive Exploration of Machine Learning Applications in Criminal Justice / N. Thoiba Singh et al. *2024 2nd International Conference on Intelligent Data Communication Technologies and Internet of Things (IDCIoT), Bengaluru, India*. 2024. P. 1339–1343. URL: https://doi.org/10.1109/IDCIoT59759.2024.10467221 .

7. Walczak S. Predicting Crime and Other Uses of Neural Networks in Police Decision Making. *Frontiers in Psychology*. 2021. Vol. 12. P. 1–11. URL: https://www.frontiersin.org/journals/psychology/articles/10.3389/fpsyg.2021.587943/full (access date: 19.05.2025).

8. Artificial Intelligence in Crime Prediction: A Survey With a Focus on Explainability / F. Ersöz et al. *IEEE Acces*. 2025. Vol. 13. P. 59646–59674. URL: https://unis.karabuk.edu.tr/yayin-detay/2_DJOqC3W_39/artificial-intelligence-in-crime-prediction-a-survey-with-a-focus-on-explainability (access date: 19.03.2025).

9. Bazhan T. O. Porivnialnyi analiz metodiv mashynnoho navchannia dlia pobudovy prohnoziv.. Suchasnyi zakhyst informatsii.. 2024. Vol. 4, iss. 60. P. 125–130. URL: https://doi.org/10.31673/2409-7292.2024.040013.

10. Cielen D., Arno D. B., Meysman M. A. Introducing Data Science Big data, machine learning, and more, using Python tools. Manning Publications, 2016. 320 p. ISBN 9781633430037. (access date: 09.02.2025).

11. Bishop C. M. Pattern Recognition and Machine Learning. New York : Springer-Verlag, 2016. 778 p. ISBN 978-0-387-31073-2.

12. Haykin S. S. Neural Networks: A Comprehensive Foundation. Hamilton, Ontario, Canada : Prentice Hall, 1999. 1104 p. ISBN 0-13-273350-1.

13. Redmond, M. (2009). Communities and Crime Unnormalized [Dataset]. UCI Machine Learning Repository. https://doi.org/10.24432/C5PC8X

Bakumenko Nina — *Candidate of Technical Sciences; Associate Professor of Computer Systems and Robotics Department;*
V.N. Karazin Kharkiv National University
Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022
e-mail: n.bakumenko@karazin.ua;
https://orcid.org/0000-0003-3496-7167

Rumiantsev Danylo — *student;*
V.N. Karazin Kharkiv National University
Svobody Sq 6, Kharkiv, Ukraine, 61022
e-mail: danylo.rumiantsev@gmail.com*;*
https://orcid.org/0009-0001-7502-8636

Crime analysis and prediction using machine learning methods

Relevance. As artificial intelligence continues to develop and computer power increases, there is growing interest in applying machine learning methods to tackle tasks that are challenging for humans. One such task is crime prediction, which has significant potential to enhance the effectiveness of law enforcement. Machine learning algorithms, including decision trees and random forests, can identify crime trends, uncover hidden patterns, and determine factors contributing to criminal activity.
Goal. The purpose of this article is to analyze the effectiveness of using machine learning methods, such as linear regression, decision trees, the k-nearest neighbors algorithm, and neural networks for crime analysis and prediction.
Research methods. Comparative analysis, experiment.
Results. The effectiveness of various machine learning methods (linear regression, Lasso regression, ridge regression, k-nearest neighbor regression, decision trees, and radial-basis neural network model) for crime analysis and prediction was analyzed. Among the considered machine learning methods, the k-nearest neighbor regression and radial-basis neural network model showed the best characteristics.
Conclusions. The analysis confirms the need for long-term and operational analysis of statistical information with subsequent prediction of factors and factors that affect crime rates using machine learning methods. The results obtained can help in studying the problem of analyzing the impact of social and demographic factors on crime, which will allow planning preventive measures, distributing law enforcement resources more effectively, etc.

Keywords: *machine learning methods, crime prediction, linear regression, Lasso regression, ridge regression, decision trees, k-nearest neighbor method, neural networks.*

Надійшла у першій редакції 12.02.2025, в останній - 19.03.2025.
The first version has been received on 12.02.2025, the final version - on 19.03.2025.

DOI: https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-02

УДК (UDC) 621.311.25:519.816

Бровко Костянтин Юрійович *к.т.н., доцент*
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна майдан Свободи, 4м. Харків, 61022, Україна
e-mail: brovkokonstantin@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-9669-9316

Буданов Павло Феофанович *к.т.н., доцент*
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна майдан Свободи, 4м. Харків, 61022, Україна
e-mail: pavelfeofanovich@ukr.net
https://orcid.org/0009-0000-4519-3879

Винокурова Наталія Дмитріївна *асистент*
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна майдан Свободи, 4м. Харків, 61022, Україна
e-mail: v.natasha.d@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-6210-838X

Інтелектуальна система моніторингу температурного режиму першого контуру енергоблоку атомної електростанції на основі фрактально-кластерного аналізу

Актуальність. Забезпечення ефективного та безпечного функціонування енергоблоків атомних електростанцій вимагає постійного контролю за температурними параметрами першого контуру. Особливу важливість має виявлення нестандартних режимів циркуляції теплоносія та запобігання кризам тепловіддачі, які можуть призвести до аварій. Сучасні методи моніторингу температурного режиму не завжди враховують складну просторову структуру теплових процесів, що знижує їхню ефективність. Тому виникає потреба у вдосконаленні методів аналізу температурного поля на основі новітніх підходів, зокрема фрактально-кластерного аналізу.
Мета. Розробка та вдосконалення методів аналізу температурного поля першого контуру реакторної установки ВВЕР-1000 з урахуванням фрактально-кластерних особливостей для підвищення точності моніторингу, прогнозування аварійних режимів роботи та оптимізації інформаційно-керуючих систем програмно-технічного комплексу автоматизованої системи управління технологічним процесом енергоблоку атомної електростанції.
Методи дослідження. У роботі застосовано методи фрактального аналізу для вивчення температурних флуктуацій у першому контурі реактора. Проведено кореляційний аналіз для встановлення взаємозв'язку між температурою теплоносія та рівнем потужності реактора. Виконано порівняльний аналіз існуючих систем температурного моніторингу з подальшим узагальненням даних і формулюванням пропозицій щодо інтеграції нових підходів у інформаційно-керуючі системи атомних електростанцій.
Результати. Показано тісний взаємозв'язок між температурними параметрами теплоносія та динамікою роботи реакторної установки. Запропоновано нову методику моніторингу, яка враховує кластерну структуру теплових процесів та дозволяє ідентифікувати потенційні кризові зони у теплопередачі. Методика забезпечує підвищену чутливість до змін у температурному полі та може бути застосована для прогнозного аналізу в режимі реального часу. Визначено переваги інтеграції такого підходу у систему керування енергоблоком.
Висновки. Запропонована методика фрактально-кластерного аналізу температурного поля дозволяє підвищити ефективність контролю за тепловими процесами у першому контурі енергоблоку атомної електростанції. Вона сприяє підвищенню надійності роботи реакторного обладнання, зниженню ризиків нештатних ситуацій та продовженню строку експлуатації. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення систем управління та забезпечення загальної безпеки експлуатації атомних енергоблоків.
Ключові слова: *фрактально-кластерний аналіз, інформаційно-керуючі системи, моніторинг, прогнозування, безпека ядерних установок*

Як цитувати: Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Винокурова Н. Д. Інтелектуальна система моніторингу температурного режиму першого контуру енергоблоку атомної електростанції на основі фрактально-кластерного аналізу. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2025. вип. 65. С.14-32. ht tps://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-02

How to quote: K. Brovko, P. Budanov and N. Vynokurova, "Intelligent system for monitoring the temperature regime of the primary circuit of a nuclear power plant power unit based on fractal-cluster

© Бровко К. Ю., Буданов П. Ф., Винокурова Н. Д., 2025
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

analysis", *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 65, pp. 14-32, 2025. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-02 [in Ukrainian]

Вступ

Сучасні енергоблоки АЕС потребують високоточних систем моніторингу температурних параметрів першого контуру, оскільки навіть незначні відхилення можуть призвести до аварійних ситуацій, зокрема до криз тепловіддачі, локальних перегрівів або нестабільності роботи реакторної установки. Ефективний контроль температури теплоносія є критичним фактором забезпечення безпечної та надійної експлуатації ядерного реактора.

Реакторна установка ВВЕР-1000 є складною теплогідравлічною системою, де температура теплоносія безпосередньо впливає на потужність реактора, а також визначає ефективність теплопередачі між активною зоною та теплообмінним обладнанням. Будь-які флуктуації температурного поля можуть бути ознакою змін у гідродинамічному режимі першого контуру, що, своєю чергою, може спричинити зниження коефіцієнта теплопередачі або порушення циркуляції теплоносія.

Важливою задачею є визначення закономірностей зміни температурного поля, що дозволить розробити ефективні методики прогнозування потенційно небезпечних відхилень. Застосування сучасних методів аналізу, зокрема фрактально-кластерного підходу та спектрального аналізу температурних флуктуацій, дає змогу виявляти навіть незначні відхилення технологічних параметрів та прогнозувати критичні стани.

Інтеграція цих методик у інформаційно-керуючі системи програмно-технічних комплексів (ПТК) автоматизованих систем управління технологічним процесом (АСУ ТП) енергоблоків АЕС дозволить значно підвищити точність і оперативність моніторингу стану першого контуру. Використання адаптивних алгоритмів аналізу та прогнозування температурних відхилень в інформаційно-керуючих системах ПТК АСУ ТП енергоблоків АЕС сприятиме своєчасному виявленню ризиків та запобіганню аварійним ситуаціям.

Впровадження таких підходів у систему управління реакторними установками забезпечить більш ефективне управління тепловими процесами, зменшення експлуатаційних ризиків та підвищення рівня безпеки енергоблоків АЕС. Це, у свою чергу, сприятиме продовженню терміну експлуатації реакторного обладнання та підвищенню надійності роботи всієї ядерної енергетичної установки.

Аналіз літературних джерел та постановка проблеми. У роботах [1, 2] досліджено вплив температурних флуктуацій у першому контурі реакторної установки ВВЕР-1000 на ефективність теплопередачі. У дослідженні використано методи кореляційного аналізу, які дозволили оцінити основні тенденції зміни температурного поля в залежності від експлуатаційних параметрів. Однак у роботах не розглянуто можливість застосування фрактально-кластерного підходу для більш глибокого аналізу структури температурного поля та прогнозування нештатних режимів роботи реактора, що може значно розширити можливості контролю.

Авторами в роботах [3, 4] проведено аналіз методів контролю температурного режиму першого контуру енергоблоків АЕС. Вивчено традиційні та сучасні підходи до моніторингу температурного поля, а також їхню інтеграцію в автоматизовані системи управління технологічним процесом. Однак автори сфокусувалися переважно на стандартних алгоритмах температурного контролю, не враховуючи складну нелінійну динаміку температурного поля та її вплив на теплогідравлічні характеристики першого контуру.

У дослідженнях [5, 6] розглянуто алгоритми прогнозування температурних відхилень у першому контурі АЕС на основі нейронних мереж. Результати показали ефективність такого підходу у виявленні небезпечних режимів роботи реактора. Проте в роботах відсутній аналіз кореляційних та фрактальних параметрів температурного поля, що може забезпечити більш точне прогнозування кризових явищ.

Авторами у роботах [7, 8] запропоновано використання спектрального аналізу температурних флуктуацій для оцінки теплогідравлічного стану першого контуру. Виявлено характерні частотні діапазони, що відповідають різним режимам роботи реакторної установки. Однак дослідження не враховують вплив кластерної структури температурного поля, що може містити додаткову інформацію про потенційні зони нестабільності та їхній розвиток.

У роботах [9, 10] було розглянуто питання стабільності теплових потоків у активній зоні реактора ВВЕР-1000. Запропоновано математичні моделі розподілу температури, що базуються на рівняннях теплопровідності. Проте авторами не було приділено уваги реальним експлуатаційним даним, що обмежує практичне застосування отриманих результатів.

Авторами у роботах [11, 12] проведено дослідження інформаційно-керуючих систем ПТК АСУ ТП енергоблоків АЕС. Описано основні принципи побудови та функціонування таких систем, зокрема в частині моніторингу температурних параметрів першого контуру. Однак методи аналізу температурних відхилень у дослідженнях зведені до стандартних алгоритмів без врахування новітніх підходів, таких як фрактальний аналіз або методи машинного навчання.

У роботах [13–15] досліджено методи фрактального аналізу для оцінки складних температурних процесів у теплогідравлічних системах. Автори розглянули можливості застосування фрактальної розмірності та методів багатомасштабного аналізу для виявлення відхилень у температурному полі. Зокрема, в роботі [16] проаналізовано поведінку температурних флуктуацій у ядерних реакторах та доведено, що структура теплопередачі має фрактальну природу. Однак у дослідженні не було адаптовано отримані результати для практичного використання в системах управління технологічними процесами на АЕС.

У дослідженнях [17, 18] запропоновано кластерний аналіз температурних відхилень у першому контурі реакторної установки. Використано алгоритми машинного навчання для класифікації аномальних станів на основі температурних флуктуацій. Проте автори не розглянули питання інтеграції таких алгоритмів у програмно-технічні комплекси (ПТК) АСУ ТП, що є ключовим для їхнього практичного впровадження в системи управління реакторними установками.

Аналіз літературних джерел свідчить про значний інтерес до проблеми моніторингу температурного режиму першого контуру реакторних установок. Водночас більшість існуючих підходів зосереджені на традиційних методах контролю, які не враховують складну фрактально-кластерну структуру температурного поля. Це обмежує можливості точного прогнозування відхилень технологічних параметрів та своєчасного виявлення потенційно небезпечних режимів роботи реактора.

Виникає необхідність розробки нових методів аналізу температурних флуктуацій, що поєднують фрактально-кластерний, спектральний та кореляційний підходи. Особливо важливим є інтеграція цих методик у інформаційно-керуючі ПТК АСУ ТП енергоблоків АЕС. Це дозволить підвищити точність моніторингу, забезпечити своєчасне реагування на відхилення температурного поля та підвищити рівень безпеки експлуатації реакторних установок.

Мета дослідження. Розробка та вдосконалення методів аналізу температурного поля першого контуру реакторної установки ВВЕР-1000 з урахуванням фрактально-кластерних особливостей для підвищення точності моніторингу, прогнозування аварійних режимів роботи та оптимізації інформаційно-керуючих систем ПТК АСУ ТП енергоблоків АЕС.

Завдання дослідження:

1. Проаналізувати особливості температурного поля першого контуру реакторної установки типу ВВЕР з урахуванням кластерної структури теплових процесів та виявити чинники, що сприяють утворенню локальних зон перегріву і розвитку криз тепловіддачі.
2. Розробити та обґрунтувати фрактально-кластерний підхід до моніторингу температурного режиму, що дозволяє ідентифікувати аномальні області нагріву з підвищеною точністю, та оцінити його переваги порівняно з традиційними методами аналізу.
3. Запропонувати інтеграцію фрактально-кластерного аналізу та прогнозного моделювання в автоматизовану систему управління енергоблоком для підвищення надійності теплового контролю, стабільності роботи реакторного обладнання та загального рівня експлуатаційної безпеки.

Матеріали дослідження. Контроль температури теплоносія першого контуру є критично важливим, оскільки температурне поле цього середовища має фрактальну структуру з локальними зонами теплових неоднорідностей. Ці кластери температурних флуктуацій визначають ефективність теплопередачі від тепловиділяючих елементів (ТВЕЛів) до парогенераторів і впливають на стабільність теплогідравлічних процесів у реакторній установці. Врахування фрактально-кластерних особливостей розподілу температури дозволяє точніше оцінювати ризики

криз тепловіддачі та перегріву активної зони, що є ключовим для забезпечення безпеки обладнання, зокрема корпусу реактора, трубопроводів і парогенераторів.

Для ефективного моніторингу та управління температурним режимом першого контуру необхідно не лише встановлювати номінальні та допустимі значення температури, а й аналізувати структуру теплових кластерів, що утворюються в системі. Визначення точок контролю має ґрунтуватися на просторовій кластеризації температурних відхилень, що дозволяє оптимізувати вибір датчиків та вдосконалити методи і алгоритми вимірювання, обробки та аналізу даних.

Основні вимоги до температурного режиму першого контуру енергоблоку ВВЕР-1000 регламентуються жорсткими нормативами, які базуються на проєктній документації та стандартах безпеки (табл. 1). Однак, врахування фрактальних характеристик температурного поля дозволяє не лише контролювати окремі точки, а й прогнозувати поведінку теплогідравлічної системи на основі аналізу масштабної самоподібності температурних змін.

При перевищенні температури 336°C або її зниженні нижче 304°C інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС автоматично ініціює заходи для стабілізації процесу, враховуючи не тільки локальні показники, але й просторово-часову динаміку змін температурного поля.

Оскільки теплоносій циркулює через різні етапи системи, його температура змінюється не лінійно, а формує динамічні фрактальні структури, які потребують моніторингу в кількох ключових точках. Впровадження фрактально-кластерного підходу дозволяє підвищити точність контролю та оперативність реагування, що є критично важливим для стабільної та безпечної роботи енергоблоку АЕС.

Таблиця 1. Номінальні та граничні значення температури теплоносія
Table 1. Nominal and limit values of coolant temperature

Параметр	Значення, °C
Номінальна температура на виході з активної зони	320°C
Допустиме відхилення від номіналу	±5% (304–336°C)
Температура на вході у реактор	≈ 290–295°C
Гранична температура для безпечної експлуатації	340°C
Температура початку криз тепловіддачі	600–800°C (локально у ТВЕЛах)
Критична температура аварійного стану	>1200°C (плавлення оболонок ТВЕЛів)

Основним місцем вимірювання температури є вихід теплоносія з активної зони реактора, оскільки саме цей показник визначає рівень тепловиділення у паливних елементах. З позиції фрактально-кластерного аналізу, розподіл температури в цій області може мати самоподібну структуру, а локальні неоднорідності можуть формувати температурні кластери, що сигналізують про зміну умов теплопередачі. Температура на виході повинна залишатися в межах 320°C ±5%, оскільки перевищення цього значення може свідчити про формування високотемпературних кластерів, які викликають перегрів ТВЕЛів, а зниження – про порушення рівномірності тепловиділення. Датчики у цій зоні встановлюються у вихідних патрубках колектора реактора, зазвичай у кожній із чотирьох циркуляційних петель, що дозволяє ідентифікувати просторову структуру температурного поля.

Другим важливим місцем вимірювання є вхід теплоносія у реактор, розташований після парогенераторів. Згідно з фрактальним підходом, ефективність теплообміну між першим і другим контурами може бути описана через динаміку кластерів охолодження. Якщо температура на вході перевищує 300°C, це може свідчити про недостатнє охолодження у парогенераторах, що призводить до зменшення температурного градієнта та погіршення циркуляції теплоносія. Якщо температура падає нижче 285°C, це може бути ознакою надмірної дисперсії температурного поля, що негативно впливає на ефективність пароутворення та роботу турбіни.

Температура контролюється також у зонах роботи головних циркуляційних насосів (ГЦН), які забезпечують переміщення теплоносія між температурними кластерами системи. Відповідність температури у цій зоні номінальним значенням підтверджує стабільність циркуляційного процесу. Якщо температура перевищує 310°C, це може сигналізувати про зменшення ефективності циркуляції через формування стоячих температурних хвиль або локальних зон застою. Якщо ж температура падає нижче 285°C, може мати місце надмірне охолодження певних

кластерів теплоносія, що порушує рівномірність теплопередачі та впливає на загальну ефективність реактора.

Додаткові контрольні точки розташовані у трубопроводах першого контуру, де вони дозволяють аналізувати просторову фрактальність теплопередачі. Виявлення локальних відхилень температури від номінальних значень свідчить про нерівномірний розподіл теплоносія або проблеми у теплообмінниках, які можуть формувати довготривалі теплові кластери, що впливають на загальний баланс енергосистеми реактора.

Окрему увагу приділяють вимірюванню температури усередині активної зони реактора, де знаходяться паливні елементи, що генерують тепло. Внутрішньоактивні датчики дозволяють аналізувати динаміку фрактальних змін температури ТВЕЛів, що забезпечує найточніші дані щодо стабільності тепловиділення. Якщо температура у паливних збірках перевищує 600°C, починається криза тепловіддачі, що означає формування критичних теплових кластерів, здатних спричинити локальні аварійні ситуації. Якщо температура досягає 1200°C, можлива деструкція оболонок паливних елементів, що є загрозою для безпеки енергоблоку.

Таким чином, контроль температури теплоносія здійснюється у п’яти ключових точках:

– на виході з активної зони – оцінка тепловиділення та формування температурних кластерів;

– на вході у реактор – аналіз ефективності теплообміну;

– у головних циркуляційних насосах – контроль рівномірності циркуляції теплоносія;

– у трубопроводах першого контуру – виявлення просторових відхилень температури.

– у паливних збірках – моніторинг критичних температур ТВЕЛів.

Запровадження фрактально-кластерного аналізу дозволяє отримати не лише статичну картину температурних показників, а й оцінити їхню динамічну змінність, що сприяє підвищенню точності контролю та швидкості реагування на відхилення, забезпечуючи стабільну та безпечну роботу енергоблоку АЕС.

Для вимірювання температури теплоносія у першому контурі реакторної установки ВВЕР-1000 використовується комплексна система датчиків, до складу якої входять термоперетворювачі опору (ТПО) та термопари. Вибір конкретного типу датчиків та їх розташування здійснюється з урахуванням фрактально-кластерного аналізу температурних флуктуацій, що дозволяє ідентифікувати зони локальних неоднорідності та оцінювати динаміку теплопередачі в системі. Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС використовує отримані температурні дані для автоматизованого контролю та коригування параметрів теплоносія з метою підтримання стабільності реакторної установки. Термоперетворювачі опору працюють за принципом зміни електричного опору металевого провідника (зазвичай платини) при зміні температури, що дозволяє отримувати високоточні дані про стан теплоносія у ключових точках реакторного циклу. Чутливість ТПО до незначних температурних відхилень робить їх особливо ефективними для моніторингу зон, де важливим є точне відстеження теплових градієнтів. Термопари, що базуються на термоелектричному ефекті, дозволяють швидко фіксувати миттєві зміни температури, що є критично важливим для виявлення криз тепловіддачі та запобігання локальним перегрівам. Поєднання цих двох типів датчиків у контрольній системі забезпечує комплексний підхід до вимірювання температури теплоносія, дозволяючи не лише отримувати дані у режимі реального часу, а й прогнозувати можливі відхилення на основі виявлення закономірностей у зміні температурного поля. Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП аналізує динаміку розподілу теплових кластерів у першому контурі та адаптує параметри циркуляції теплоносія для забезпечення оптимальних умов експлуатації реактора. Важливим аспектом цього підходу є можливість виявлення самоподібних структур у температурному полі, що дозволяє прогнозувати розвиток критичних ситуацій ще до їх фактичного настання. Формування стійких теплових кластерів може вказувати на порушення циркуляції або зміну характеристик теплообміну, що потребує оперативного коригування параметрів теплоносія. Використання фрактального аналізу температурного поля у поєднанні з автоматизованими алгоритмами ПТК АСУ ТП дає змогу покращити точність моніторингу, оптимізувати роботу енергоблоку та підвищити загальний рівень безпеки ядерної установки.

Залежність опору від температури для платинових датчиків, з урахуванням фрактальної корекції виражається формулою (1):

$$R(T) = R_0(1+\alpha T)\cdot\left(\frac{1}{D_f}\right)^{\mu}, \quad (1)$$

де: $R(T)$ – електричний опір при температурі T; R_0 – номінальний опір при 0°C; α – температурний коефіцієнт опору (для платини α ≈ 0,00385 1/°C); D_f – фрактальна розмірність температурного поля, яка враховує нерівномірний розподіл температури у контрольних точках; μ – коефіцієнт, що регулює вплив фрактальної розмірності на зміну опору.

У штатному режимі циркуляції теплоносія система є максимально стабільною, а температурні флуктуації рівномірно розподілені, тому D_f = 3, що приводить коефіцієнт коригування до $(1/3)^{\mu}$.

При відхиленні від норми (локальні порушення циркуляції, кризи тепловіддачі, нерівномірне розсіювання тепла) фрактальна розмірність зменшується, що збільшує значення коригуючого множника, впливаючи на опір і дозволяючи інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП фіксувати нестабільності у розподілі температури.

Якщо, наприклад, через порушення циркуляції теплоносія формується локальний перегрів, то D_f може зменшитися до 2.5 або нижче, що підвищить коефіцієнт корекції й сигналізуватиме про відхилення значень температурного поля.

Основні типи ТПО, що використовуються у ВВЕР-1000 це Pt100 – номінальний опір 100 Ом при 0°C, висока точність (±0.1°C), використовується у трубопроводах першого контуру та Pt1000 – номінальний опір 1000 Ом при 0°C, вища чутливість у порівнянні з Pt100, застосовується у місцях, де потрібне швидке реагування на зміну температури.

ТПО характеризуються високою точністю вимірювань та стабільністю характеристик у часі, що робить їх важливим елементом системи контролю температури теплоносія у першому контурі реакторної установки ВВЕР-1000. Проте, їхня реакція на зміни температури є відносно повільною, а механічна чутливість обмежує їх застосування в умовах підвищених динамічних навантажень. У межах фрактально-кластерного підходу температурне поле першого контуру розглядається як складна самоподібна структура, що складається з локальних температурних кластерів, які можуть змінюватися в просторі та часі. Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС використовує ці особливості для вибору оптимальних точок вимірювання, що забезпечує максимальну точність та ефективність моніторингу теплогідравлічних процесів.

Термопари працюють на основі термоелектричного ефекту Зеєбека, згідно з яким при контакті двох різнорідних металів у замкненому контурі виникає електрорушійна сила (ЕРС), пропорційна температурному градієнту між гарячим та холодним спаєм. Це явище описується рівнянням:

$$U = S(T_1 - T_2), \quad (2)$$

де: U – термо-ЕРС (мВ); S – коефіцієнт термоелектричної чутливості (для типу K ~ 41 мкВ/°C), T_1, T_2 – температури гарячого та холодного спаю.

У реакторній установці ВВЕР-1000 застосовуються два основні типи термопар: типу K (Хромель-Алюмель), що працюють у діапазоні від – 200°C до +1300°C для контролю температури у першому контурі, та типу B (Платина-Родій) із діапазоном від 600°C до 1800°C для вимірювання температури у внутрішньоактивній зоні реактора. Фрактально-кластерний підхід дозволяє аналізувати динаміку розподілу теплових потоків у реакторній установці, виділяючи зони підвищеної турбулентності та потенційних криз тепловіддачі.

Термопари мають широкий діапазон вимірювань, здатні швидко реагувати на локальні зміни температурного поля та витримують екстремальні умови, зокрема високий рівень радіації та тиску. Це робить їх незамінними для моніторингу критичних зон, таких як активна зона реактора, вихід ТВЕЛів та області з потенційним перегрівом. Проте їхня точність є нижчою порівняно з ТПО (похибка ±1–2°C), а також вони зазнають часової деградації через дифузійні процеси у металах та потребують компенсаційних дротів для точних вимірювань.

Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС інтегрує дані від обох типів датчиків, застосовуючи алгоритми обробки, що враховують фрактальну структуру теплових процесів. Це дозволяє не лише проводити моніторинг, а й прогнозувати можливі критичні стани, такі як локальні перегріви або нерівномірний розподіл температурних кластерів у першому контурі. Такий підхід забезпечує підвищену безпеку та стабільність роботи реакторної установки, дозволяючи швидко реагувати на відхилення та оптимізувати режими роботи енергоблоку. Зрівняльна характеристика ТПО та термопар представлена в таблиці 2.

Таблиця 2. Порівняння ТПО та термопар
Table 2. Comparison of resistance temperature transducers and thermocouples

Характеристика	ТПО (Pt100, Pt1000)	Термопари (*K*, *B*)
Принцип роботи	Зміна електричного опору	Термоелектричний ефект
Точність	Висока (±0.1°C)	Середня (±1-2°C)
Діапазон температур	До 600°C	До 1800°C
Час реакції	Відносно повільний	Швидкий
Стійкість до радіації	Середня	Висока
Використання	Трубопроводи, контурні системи	Внутрішньоактивні вимірювання, високотемпературні зони

Аналіз даних із табл. 2 дозволяє зробити висновок, що ТПО найбільш ефективні у зонах, де критично важлива висока точність та довготривала стабільність вимірювань, зокрема у трубопроводах першого контуру, де необхідно контролювати рівномірність теплопередачі. Водночас термопари, завдяки своїй стійкості до екстремальних температур і жорстких умов експлуатації, оптимально підходять для зон із високими термічними навантаженнями, таких як активна зона реактора та вихідні патрубки ТВЕЛів, де можливе утворення локальних перегрівів.

У межах фрактально-кластерного підходу контроль температури у реакторних установках ВВЕР-1000 розглядається як багаторівневий процес, у якому температура теплоносія та елементів конструкції формується як динамічна система теплових кластерів. ТПО дозволяють фіксувати довготривалі температурні зміни, що характеризують загальну стабільність циркуляції теплоносія, тоді як термопари реагують на швидкоплинні теплові флуктуації, що виникають унаслідок локальних змін теплового навантаження.

Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС інтегрує показники обох типів датчиків, використовуючи алгоритми фрактального аналізу температурного поля для виявлення самоподібних структур теплових відхилень. Це дозволяє не тільки отримувати поточну інформацію про температурний стан системи, а й прогнозувати можливі аварійні стани, такі як локальні кризи тепловіддачі або нерівномірне розподілення циркуляційних потоків.

Вимірювання температури теплоносія у першому контурі є лише першим етапом багаторівневої системи контролю. Отримані значення температури не просто передаються в систему управління, а проходять багатоступеневу обробку та аналіз в інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС, що включає:

– первинну фільтрацію для усунення шумів та врахування похибок датчиків;

– фрактально-кластерний аналіз для ідентифікації аномальних температурних зон та визначення масштабів теплових неоднорідностей.

– адаптивну корекцію технологічних параметрів циркуляції теплоносія залежно від виявлених теплових кластерів.

– прогнозування можливих відхилень на основі аналізу динаміки температурних змін у просторі та часі.

Впровадження цього підходу дозволяє не тільки підвищити точність контролю температури, а й забезпечує прогнозно-адаптивне керування тепловими процесами у першому контурі, що є критично важливим для запобігання аварійним ситуаціям та стабільної експлуатації енергоблоку АЕС. Блок-схема алгоритму цього процесу представлений на рис. 1.

Етап 1: Аналогово-цифрове перетворення (АЦП) та калібрування сигналів

На першому етапі контролю температури здійснюється збір та передача даних в інформаційно-керуючу систему ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС, що є ключовим для аналізу теплових процесів у першому контурі реакторної установки ВВЕР-1000. Температурні параметри надходять у систему моніторингу реактора (СМР) від датчиків. Це дозволяє зафіксувати як глобальні

температурні зміни, так і локальні відхилення, що формуються у вигляді теплових кластерів у різних точках циркуляційного контуру.

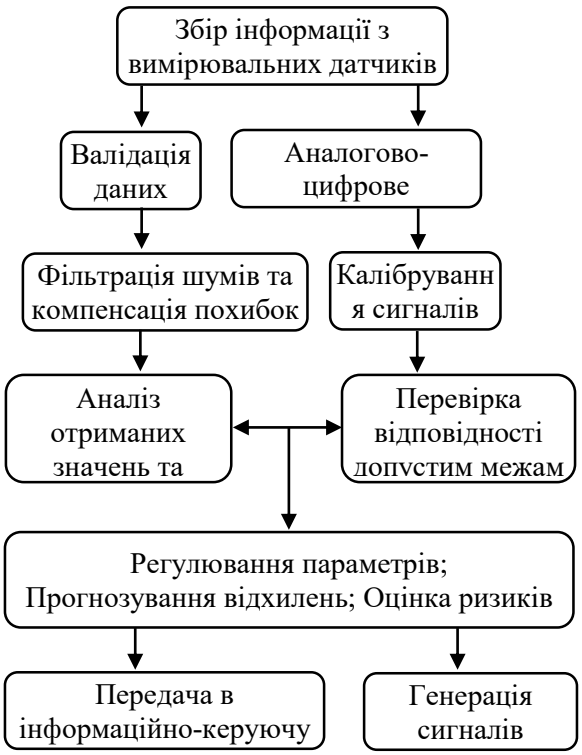


Рис. 1. Блок-схема алгоритму обробки інформації в інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС

Fig. 1. Block diagram of the information processing algorithm in the information and control system of the NPP power unit's

Вимірювання передаються по спеціалізованих сигнальних лініях у вигляді аналогових або цифрових сигналів залежно від типу датчиків. Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС забезпечує їх першочергову фільтрацію, усуваючи випадкові похибки та коригуючи значення відповідно до алгоритмів фрактального згладжування, що дозволяє виявляти закономірності у зміні температурного поля.

Усі отримані значення передаються у систему реєстрації та аналізу параметрів (СРАР), яка виконує попередню перевірку коректності вимірювань, визначаючи рівень узгодженості отриманих даних із розрахунковими моделями теплогідравлічних процесів. Якщо система виявляє позаштатні температурні кластери або самоподібні структури відхилень, ці дані передаються на детальну фрактальну обробку, що дозволяє оцінити потенційні ризики аварійних станів у першому контурі.

Таким чином, перший етап є не просто збором інформації, а й інтелектуальним аналізом температурних даних, що забезпечує точність вимірювань та формування адаптивних рішень для подальшого керування тепловими процесами реакторної установки енергоблоку ВВЕР-1000.

Етап 2: Аналогово-цифрове перетворення (АЦП) та калібрування сигналів.

На другому етапі здійснюється аналогово-цифрове перетворення (АЦП) та калібрування сигналів, що є важливим процесом у інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС. Оскільки більшість датчиків передають аналогові сигнали (напругу, струм або зміни опору), їх необхідно підготувати та перетворити у цифровий формат для подальшого аналізу та обробки.

Для датчиків, що видають сигнал напруги (наприклад термопари), сигнал попередньо підсилюється, лінеаризується та може бути перетворений у струмовий сигнал 4-20 мА для підвищення завадостійкості при передачі даних. Датчики з вихідним струмовим сигналом (4-20 мА) підключаються через шунтовий резистор для отримання напруги, придатної для оцифрування.

Аналогово-цифрове перетворення здійснюється за формулою (3):

$$V_{dig} = \frac{V_{an} \cdot 2^N}{V_{ref}}, \tag{3}$$

де V_{dig} – цифрове значення сигналу; V_{an} – отримане аналогове значення; V_{ref} – референсна напруга АЦП; N – розрядність АЦП (16-24 біти).

У стабільному режимі теплопередачі та циркуляції теплоносія температурне поле є однорідним, і D_f = 3. У цьому випадку отримані цифрові значення використовуються без додаткової корекції.

При виникненні локальних відхилень (неоднорідностей) температури (перегрів, порушення циркуляції, криза тепловіддачі) D_f зменшується, що вказує на підвищену неоднорідність температурного розподілу. Це враховується на етапі цифрової обробки сигналу шляхом введення коригуючої функції:

$$V_{digC} = V_{dig} \cdot f\left(D_f, \xi\right), \tag{4}$$

де V_{digC} – скориговане значення після аналізу неоднорідності температурного поля; $f\left(D_f, \xi\right) = 1 + \xi\left(3 - D_f\right)$ – функція корекції, що визначає рівень впливу температурної неоднорідності на точність вимірювання; ξ – емпіричний коефіцієнт, що визначає ступінь впливу неоднорідності на точність вимірювань. Типові значення ξ можуть бути в межах 0.1÷0.5 залежно від рівня чутливості системи до змін температури.

Розрядність 16-24 біти для аналогово-цифрового перетворення використовується на АЕС через такі причини:

1. Висока точність вимірювань

– 16 біт означає, що сигнал може бути представлений у 65 536 рівнях (2^{16});

– 24 біти дають 16 777 216 рівнів, що дозволяє зчитувати навіть мінімальні зміни температури, особливо важливі для аналізу температурних флуктуацій.

Для АЕС, де критично важливе точне вимірювання температури, тиску та інших параметрів, використання 12-бітних АЦП (4096 рівнів) є недостатнім.

2. Робота з малими сигналами

– деякі датчики (наприклад, термопари) видають дуже слабкі сигнали (від мікровольт до мілівольт);

– висока розрядність дозволяє більш точно зчитувати такі малі напруги.

3. Компенсація шумів та дрейфу

– на АЕС є значний рівень електромагнітних перешкод (від насосів, генераторів, силового обладнання);

– використання високорозрядних АЦП (18-24 біти) з вбудованими фільтрами дозволяє мінімізувати вплив шумів.

4. Широкий динамічний діапазон

– датчики можуть працювати в дуже різних умовах (від кімнатної температури до сотень градусів);

– чутливість при цьому не повинна втрачатися – що й забезпечується 24-бітним АЦП.

Таким чином, на даному етапі, урахування фрактальної розмірності при аналогово-цифровому перетворенні дозволяє інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС не просто отримувати дані про температуру, а й аналізувати їхню структурну неоднорідність, що є критично важливим для прогнозування кризових станів у першому контурі та забезпечення стабільної та безпечної експлуатації енергоблоку АЕС.

Етап 3: Фільтрація шумів та компенсація похибок температурних вимірювань.

У процесі вимірювання температури теплоносія першого контуру в інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС можуть виникати похибки, спричинені електромагнітними завадами, тепловим дрейфом датчиків, механічними вібраціями та

імпульсними стрибками напруги. Оскільки температурне поле реактора має фрактально-кластерну структуру, його неоднорідність безпосередньо впливає на точність вимірювань.

Для усунення випадкових флуктуацій та стабілізації температурних даних застосовується *фільтр Калмана*, який дозволяє згладжувати показники з урахуванням фрактальної розмірності температурного поля. Оновлене оцінене значення температури розраховується за формулою (5):

$$T_k = T_{k-1} + K_k \left(Z_{meas} - T_{k-1} \right), \tag{5}$$

де T_k – скориговане значення температури; T_{k-1} – прогнозоване значення перед оновленням; K_k – коефіцієнт Калмана, що визначає вагу виміряного значення; Z_{meas} – фактичне виміряне значення датчиком.

Коефіцієнт Калмана коригується з урахуванням фрактальної неоднорідності температурного поля обчислюється за формулою (6):

$$K_k = \frac{P_{k-1}}{P_{k-1} + R} \cdot \left(1 + \lambda \left(3 - D_f \right) \right), \tag{6}$$

P_{k-1} – дисперсія прогнозу; R – дисперсія шуму вимірюваного параметра; D_f – фрактальна розмірність температурного розподілу; λ – це коефіцієнт чутливості, який визначає, наскільки сильно зміна фрактальної розмірності D_f впливає на відповідну функцію (для фільтра Калмана: $\lambda \approx 0.1 \div 0.5$).

Якщо $D_f < 3$ (зростає неоднорідність), множник $1 + \lambda \left(3 - D_f \right)$ збільшує вагу виміряного значення, що дозволяє швидше реагувати на зміни. Крім того, при зменшенні D_f (що свідчить про зростання неоднорідності температурного поля), система автоматично збільшує точність згладжування, щоб мінімізувати вплив шумів.

Для виключення локальних стрибків температури, спричинених локальними кризами тепловіддачі або нестабільностями циркуляції, використовується медіанний фільтр (7):

$$T_k = median\left(T_{k-n}, ..., T_k, ..., T_{k+n} \right), \tag{7}$$

де n – розмір вибірки. Цей метод ефективний у зонах, де температура може змінюватися стрибкоподібно, дозволяючи усунути локальні відхилення значень, що не відповідають загальній температурній динаміці.

Для усунення високочастотних температурних шумів застосовується *експоненційний фільтр низьких частот* (8):

$$T_k = \alpha T_{k-1} + \left(1 - \alpha \right) Z_k \tag{8}$$

де α – коефіцієнт експоненційного згладжування, який визначає, наскільки сильно нові дані впливають на оновлене значення температури. Чим більше α, тим більше враховується поточне значення температури, і тим менше вплив попередніх даних (9):

$$\alpha = \alpha_0 + k \left(3 - D_f \right) \tag{9}$$

де α_0 – базове значення коефіцієнта згладжування при штатному режимі роботи реактора (D_f = 3, α = 0.5); k – коефіцієнт корекції, що визначає, наскільки швидко змінюється α при зміні фрактальної розмірності температурного поля D_f. Якщо k більше, то згладжування змінюється швидше ($k \approx 0.1 \div 0.5$).

Якщо D_f знижується (наприклад, через нестабільність циркуляції теплоносія), коефіцієнт α збільшується, що підвищує рівень згладжування і запобігає поширенню локальних температурних збурень.

Довготривала експлуатація датчиків може призводити до відхилень температурних вимірювань через деградацію сенсорів. *Компенсація теплового дрейфу* здійснюється за формулою (10):

$$T_k = T_{ref} + \left(T_k - T_{sensor}\right) \cdot \left(1 + \beta \ln\left(\frac{3}{D_f}\right)\right), \tag{10}$$

де T_{ref} – температура, виміряна еталонним датчиком; T_{sensor} – температура, зафіксована датчиком, що підлягає корекції; β – коефіцієнт корекції, що залежить від типу сенсора.

Варіація коефіцієнту корекції β, який залежить від характеристик сенсора представлена в табл. 3.

Таблиця 3. Діапазон β в залежності від типу сенсора
Table 3. Range β depending on sensor type

Тип сенсора	Типова похибка	Діапазон β
Термоперетворювач опору Pt100	±0.1°C	0.01 – 0.05
Термоперетворювач опору Pt1000	±0.05°C	0.005 – 0.02
Термопара (K, J)	±1-2°C	0.1 – 0.3
Нелінійні сенсори (NTC, PTC)	±2-5°C	0.2 – 0.5

Деякі параметри, такі як тиск або рівень теплоносія, залежать від температури. Для їхньої корекції застосовується температурна компенсація за формулою (11):

$$T_k = T_{ref} + \left(T_k - T_{sensor}\right) \cdot \left(1 + \beta \ln\left(\frac{3}{D_f}\right)\right), \tag{11}$$

де γ – коефіцієнт температурної компенсації.

При зниженні D_f інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС автоматично збільшує точність корекції, компенсуючи похибки датчиків у зонах нестабільного температурного розподілу.

Оскільки тиск та рівень теплоносія залежать від температури, необхідно враховувати їхню зміну при коливаннях температурного режиму. Коригування здійснюється за фрактально-модифікованою формулою (12):

$$X_k = X_0 + K_T \left(1 + \upsilon\left(3 - D_f\right)\right)\left(T_k - T_0\right), \tag{12}$$

де X_0 – базове значення параметра; K_T – коефіцієнт температурної компенсації; T_k – поточна температура; T_0 – номінальна температура; υ – фрактальна корекція впливу температурних змін.

Якщо виявляється різке зниження фрактальної розмірності D_f, система адаптивно змінює коефіцієнт K_T, підлаштовуючи рівень корекції залежно від інтенсивності змін температури.

Фільтровані температурні дані передаються в інформаційно-керуючу систему ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС, де аналізується їхня відповідність із взаємопов’язаними параметрами роботи реактора. Ключовими є:

– різниця температур між входом та виходом активної зони – визначає рівень тепловиділення та стабільність реакторного процесу;

– баланс температури та нейтронного потоку – якщо теплоносій не ефективно відводить енергію, можливе локальне перегрівання ТВЕЛів;

– температурна рівномірність у циркуляційних петлях – аналіз фрактальної розмірності допомагає виявити локальні інформаційні неоднорідності, що можуть бути ознакою нестабільності потоку.

Впровадження фрактально-кластерного підходу у процес фільтрації та компенсації температурних вимірювань дозволяє не лише підвищити точність моніторингу, а й запобігти можливим аварійним станам у першому контурі. Використання адаптивних алгоритмів фільтрації, що враховують фрактальну структуру температурного поля, забезпечує стабільну та безпечну роботу енергоблоку АЕС.

Етап 4: Фрактально-кластерний аналіз отриманих температурних значень та порівняння з допустимими параметрами.

Після збору та обробки температурних даних у інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС отримані значення порівнюються з нормативними межами. Оскільки температурне поле у першому контурі є фрактально-кластерною системою, аналіз здійснюється не лише на рівні абсолютних значень, а й з урахуванням просторово-часової структури температурних флуктуацій. Це дозволяє виявляти приховані зміни у теплопередачі та прогнозувати можливі відхилення від штатного режиму роботи реакторної установки.

Температурний моніторинг виконується на основі фрактальної розмірності температурного поля D_f, що дозволяє визначати рівень однорідності теплопередачі у різних точках першого контуру. Штатний режим відповідає $D_f \approx 3$, тоді як при локальних змінах тепловіддачі, перегріві або нестабільній циркуляції D_f знижується, що сигналізує про порушення режиму роботи теплоносія та виникнення аварійної ситуації.

Допустимі межі температури визначаються як номінальне значення з урахуванням фрактальної корекції (13):

$$T_{per} = T_{nom} \cdot \left(1 - \mu \ln \frac{3}{D_f}\right), \tag{13}$$

де T_{per} – допустиме значення температури; T_{nom} – номінальна температура у відповідній зоні; D_f – фрактальна розмірність температурного поля; μ – коефіцієнт корекції, який визначає чутливість температурного допуску до змін фрактальної розмірності.

Гнучкий параметр μ допомагає налаштовувати реакцію системи на зміну неоднорідності температурного поля.

Його значення підбирається залежно від режиму роботи реактора (стабільний, передаварійний, аварійний). Чим вище μ, тим агресивніше система знижує T_{per}, що важливо для швидкого виявлення аварійної ситуації.

Якщо D_f зменшується нижче критичного порогу, це може означати локальний перегрів, нерівномірність циркуляції або порушення тепловіддачі, що вимагає негайного втручання.

Аналіз отриманих значень виконується у трьох рівнях, що визначають ступінь необхідного реагування:

1. Незначні відхилення – параметри знаходяться у межах допуску, $D_f \approx 3$, що свідчить про стабільний режим роботи реактора.

2. Попереджувальні відхилення – температура наближається до граничних значень (D_f <2.8), що може сигналізувати про початок локального порушення циркуляції або підвищене теплове навантаження.

3. Критичні відхилення – параметри виходять за встановлені межі (D_f <2.5), що вимагає негайного коригування або активації захисних механізмів.

Якщо система фіксує зниження D_f, проводиться адаптивне регулювання, спрямоване на відновлення рівномірності теплопередачі.

У разі виявлення різкого зниження D_f, або перевищення температури задіються адаптивні механізми ПТК АСУ ТП:

– регулювання потужності реактора – автоматична зміна рівня нейтронного потоку для зменшення тепловиділення;

– коригування швидкості циркуляції теплоносія – зміна режиму роботи головних циркуляційних насосів для вирівнювання температурних градієнтів;

– адаптивна зміна концентрації бору – введення або виведення борної кислоти для корекції рівня тепловиділення у активній зоні;

– компенсація теплових навантажень у зоні ТВЕЛів – введення або виведення регулюючих стрижнів для усунення локальних перегрівів.

Якщо система фіксує критичне порушення теплового балансу (D_f <2.5), активуються аварійні системи охолодження, що забезпечують примусову подачу теплоносія для запобігання перегріву активної зони.

Температура теплоносія у першому контурі взаємопов'язана з іншими параметрами, і будь-яке відхилення повинно узгоджуватися із загальною динамікою реактора. Збільшення температури повинно відповідати підвищенню потужності реактора – якщо цього не відбувається, є ризик локального накопичення теплоти. Зниження рівня теплоносія може супроводжуватися перегрівом ТВЕЛів – необхідно контролювати баланс між температурою та об'ємом рідини. Нестабільність циркуляції змінює фрактальну розмірність температурного поля – якщо D_f знижується одночасно у кількох контрольних точках, це свідчить про порушення циркуляційного режиму. Якщо температура виходить за граничні межі, активується система аварійного захисту, яка передбачає автоматичне заглушення реактора шляхом введення усіх регулюючих стержнів, активацію пасивних систем охолодження, які подають додатковий теплоносій для усунення перегріву, сигналізацію оператору для негайного аналізу ситуації та прийняття подальших рішень.

Фрактально-кластерний аналіз дозволяє оцінювати не лише абсолютні значення температури, а й закономірності їх змін, що підвищує точність прогнозування та забезпечує оперативне реагування на можливі порушення у першому контурі. Використання фрактальної розмірності при аналізі температурних параметрів дозволяє виявляти локальні неоднорідності ще до виходу параметрів за нормативні межі, здійснювати адаптивне регулювання теплового режиму у режимі реального часу, забезпечувати комплексний контроль роботи реакторної установки, враховуючи не лише абсолютні значення, а й структурну організацію температурного поля. Таким чином, впровадження фрактально-кластерного аналізу в ПТК АСУ ТП дозволяє підвищити безпеку та ефективність експлуатації енергоблоку АЕС, забезпечуючи стабільний температурний режим і прогнозне реагування на можливі відхилення у першому контурі.

Етап 5: Фрактально-кластерне прогнозування відхилень температури та оцінка ризиків.

Прогнозування змін температури теплоносія у першому контурі реактора є критично важливим для забезпечення стабільної та безпечної експлуатації. Оскільки температурне поле першого контуру має фрактально-кластерну структуру, традиційні методи лінійного аналізу можуть бути недостатньо точними. Використання фрактальної розмірності температурного поля у прогнозних моделях дозволяє виявляти приховані закономірності, що передують аварійним відхиленням.

Інформаційно-керуюча система ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС здійснює багаторівневий аналіз, що включає:

– статистичний прогноз на основі історичних даних;

– фрактальний аналіз температурного розподілу у першому контурі;

– кореляційний аналіз залежності між температурою та іншими технологічними параметрами;

– автоматичне регулювання температури у разі наближення до граничних значень.

Основним інструментом для прогнозування змін температури є *фрактально-коригована лінійна регресія*, що враховує масштабну неоднорідність температурного поля. Формула прогнозування представлена виразом (14):

$$T_{t+1} = mT_t \cdot b\left(1 - \psi \ln \frac{3}{D_f}\right), \tag{14}$$

де T_{t+1} – прогнозована температура у момент часу t+1; T_t – поточне значення температури; m – коефіцієнт нахилу лінії зміни; b – початкове значення температури; ψ – коефіцієнт чутливості прогнозу до змін фрактальної розмірності температурного поля.

Значення ψ визначається емпірично та залежить від того, наскільки чутливою має бути система до змін фрактальної розмірності (табл. 3).

Таблиця 4. Значення коефіцієнту ψ
Table 4. Values of the coefficient ψ

Рівень чутливості	Значення ψ	Сценарій застосування
Низька чутливість	0.05−0.1	Система працює у стабільному режимі без значних коливань температури.
Середня чутливість	0.2−0.3	Використовується у стандартних умовах для раннього виявлення нестабільності.
Висока чутливість	0.4−0.6	Потрібно швидко реагувати на зміни температурного режиму, наприклад, у разі перегріву або локальних порушень циркуляції.

Якщо D_f знижується (що означає підвищену кластеризацію температурних змін), система збільшує точність прогнозу шляхом адаптивної зміни параметра *b*.

Для оцінки взаємозв'язку між температурою теплоносія та потужністю реактора застосовується *кореляційний аналіз* (15):

$$P_t = P_{\max} \cdot \frac{T_t - T_{\min}}{T_{\max} - T_{\min}} \cdot \left(1 - \sigma \ln \frac{3}{D_f}\right) \tag{15}$$

де P_t – поточна потужність реактора; $P_{\max}$ – максимальна потужність; T_t – поточна температура теплоносія; $T_{\max}, T_{\min}$ – відповідно максимальна та мінімальна температури за період спостереження; σ – коефіцієнт, що регулює вплив фрактальної розмірності на потужність (чим більше σ, тим сильніше система знижує потужність при нестабільності).

Якщо D_f зменшується, це означає формування локальних зон нестабільності, що може вказувати на порушення циркуляції теплоносія або зміну режиму тепловиділення у ТВЕЛах.

Окрім стандартних математичних методів, для прогнозування довготривалих змін температури використовується модель, що враховує *динаміку фрактальної розмірності температурного поля* (16):

$$T_{t+1} = W_0 + \sum W_i f\left(D_f, T_t\right) + \varepsilon \tag{16}$$

де W_0, W_i – вагові коефіцієнти моделі; $f\left(D_f, T_t\right)$ – фрактальна функція, що враховує структурну складність температурного поля; ε – похибка прогнозу.

Ця модель дозволяє виявляти тенденції змін температури теплоносія, що випереджають аварійні нештатні ситуації.

На рис. 2 показано зміну температури теплоносія протягом доби та її прогнозована зміна. Лінія прогнозованої зміни, отримана за допомогою методу лінійної регресії, дозволяє оцінити довгострокові зміни та потенційні відхилення від нормативних значень.

Залежність підтверджує, що зі збільшенням температури підвищується й потужність реактора, що дозволяє використовувати цей взаємозв'язок для виявлення аномалій у роботі першого контуру.

Використання фрактально-кластерного підходу у прогнозуванні температурних змін дозволяє: виявляти потенційні загрози до їх фактичного виникнення, оцінювати не тільки абсолютні значення, а й динаміку температурних флуктуацій та автоматично коригувати параметри роботи реактора на основі структурних змін температурного поля.

Таким чином, інтеграція фрактально-коригованих моделей у ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС дозволяє забезпечити стабільну експлуатацію реакторної установки, знизити ризики перегріву та покращити ефективність системи контролю температури теплоносія.

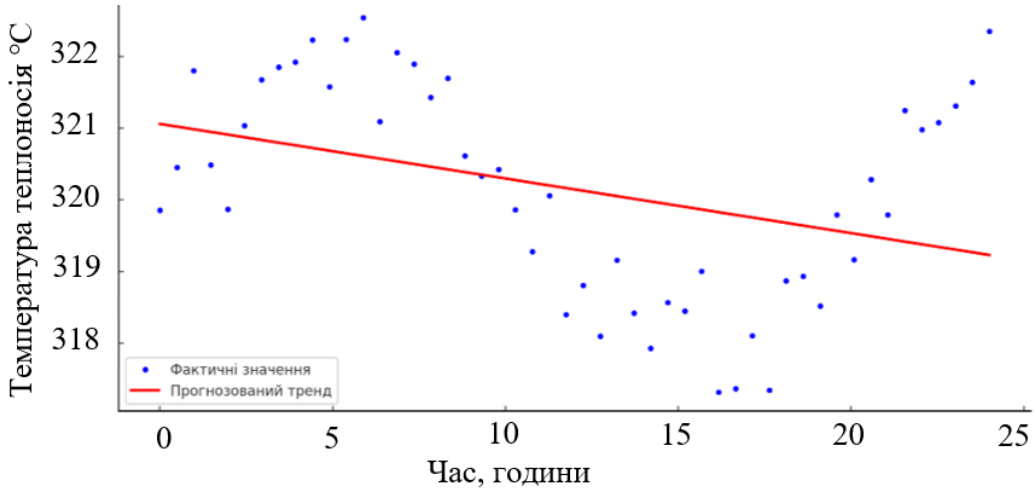


Рис. 2. Динаміка зміни температури теплоносія
Fig. 2. Dynamics of changes in coolant temperature

На рис. 3 представлена кореляція між температурою теплоносія та потужністю реактора.

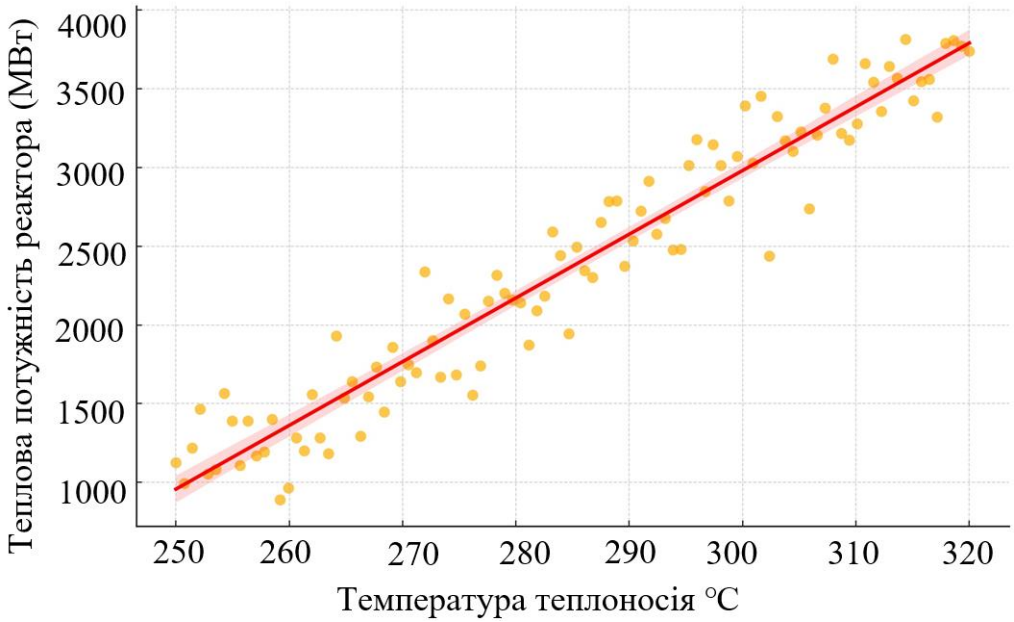


Рис.3. Кореляція між температурою та потужністю
Fig. 3. Correlation between temperature and power

<u>Етап 6:</u> Передача оброблених даних у систему моніторингу оператора

Після завершення аналізу температурних даних у інформаційно-керуючій системі ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС результати передаються у людино-машинний інтерфейс, що забезпечує

операторів структурованою, візуалізованою та динамічно оновлюваною інформацією про стан першого контуру. Враховуючи фрактально-кластерний характер температурного поля, передача даних здійснюється у кількох форматах, що дозволяє відстежувати закономірності змін температури та миттєво реагувати на аварійні відхилення.

Передача даних включає такі основні рівні представлення:

1. Числові значення параметрів – оператор отримує точні цифрові показники температури у контрольних точках, а також розрахункові фрактальні коефіцієнти, що дозволяють оцінити рівень неоднорідності температурного розподілу.

2. Інтерактивні мнемосхеми – візуалізовані схеми, що динамічно змінюють кольорове забарвлення відповідно до температурних кластерів, дозволяючи миттєво оцінювати просторовий розподіл тепла у першому контурі.

3. Графічний аналіз фрактальної динаміки – графіки змін температури у режимі реального часу із відображенням локальних фрактальних відхилень, що сигналізують про потенційні проблеми.

4. Сигнали тривоги – система автоматично генерує попередження у разі зниження фрактальної розмірності температурного поля нижче критичного порогу, що вказує на порушення циркуляції або кризу тепловіддачі.

У разі виявлення критичних температурних відхилень система моніторингу активує відповідні аварійні протоколи, що забезпечують автоматичну корекцію параметрів реактора, оповіщення персоналу та активацію аварійного охолодження. Якщо фрактальний аналіз виявляє локальні зони перегріву або порушення циркуляції, система може здійснити регулюючі дії, такі як введення поглинаючих стрижнів для зниження потужності реактора, зміну концентрації бору у теплоносії для компенсації теплового навантаження або регулювання швидкості циркуляції, що дозволяє усунути кластерні перегріви. При критичних відхиленнях температура теплоносія порівнюється з прогнозною моделлю, що враховує фрактальну розмірність температурного поля, і якщо зниження D_f перевищує допустимий поріг, система активує додаткові заходи, такі як примусова подача охолоджуючої рідини або переведення циркуляційних насосів у режим підвищеної продуктивності. У випадку виявлення нестабільності температурного поля у кількох контрольних точках одночасно система автоматично класифікує рівень ризику за допомогою алгоритмів оцінки теплової динаміки та передає оператору деталізований аналіз ситуації разом із прогнозом подальшого розвитку.

Передача оброблених температурних даних відіграє ключову роль у забезпеченні безпечної експлуатації реактора, оскільки дозволяє не тільки фіксувати поточний стан, а й прогнозувати можливі відхилення ще до їхнього критичного розвитку. Інтеграція фрактального аналізу у систему моніторингу ПТК АСУ ТП дозволяє операторам своєчасно виявляти нестабільні процеси, оцінювати їхній потенційний вплив на роботу першого контуру та вживати необхідних заходів для стабілізації температурного режиму. Використання мнемосхем, графічного аналізу та адаптивного алгоритму тривожних сигналів забезпечує багаторівневий контроль за станом теплоносія і дозволяє ефективно керувати тепловими процесами у реакторній установці. Завдяки цим механізмам оператори отримують можливість аналізувати складні динамічні процеси, що відбуваються у першому контурі, та забезпечувати стабільність його роботи, мінімізуючи ризики аварійних ситуацій.

Обговорення результатів дослідження.

Отримані результати дослідження підтверджують наявність кореляційного зв’язку між температурою теплоносія та потужністю реактора ВВЕР-1000, що узгоджується з фізичними моделями теплопередачі в першому контурі. Використання фрактально-кластерного аналізу дозволило виявити просторово-часові закономірності в розподілі температури, що сприяє кращому розумінню процесів теплообміну в активній зоні та трубопроводах першого контуру.

Запропонований метод моніторингу температурних флуктуацій виявився ефективним для виявлення відхилень у зонах нагріву, які можуть свідчити про нерівномірний розподіл теплоносія або локальні порушення циркуляції. Зокрема, результати дослідження показали, що формування стійких високотемпературних кластерів може передувати кризі тепловіддачі, що є критично важливим для забезпечення безпечної експлуатації реакторної установки. Виявлено, що при наближенні температури теплоносія до граничних значень (близько 336°C) зростає ймовірність

появи локальних зон із підвищеною температурою, які можуть призвести до прискореного старіння матеріалів та погіршення ефективності теплопередачі.

Результати аналізу також продемонстрували, що традиційні методи контролю температури, які базуються на точкових вимірюваннях, не завжди враховують динаміку змін температурного поля. Фрактальний підхід дозволяє прогнозувати розвиток теплових відхилень, аналізуючи самоподібні структури температурного розподілу. Це відкриває нові можливості для вдосконалення інформаційно-керуючих систем ПТК АСУ ТП енергоблоку АЕС, оскільки прогнозний аналіз у режимі реального часу дозволяє завчасно реагувати на потенційно небезпечні зміни.

Практичне застосування отриманих результатів дозволяє не лише підвищити точність контролю температурного режиму, але й адаптувати параметри роботи реактора під змінні умови експлуатації. Наприклад, впровадження автоматизованих алгоритмів коригування циркуляції теплоносія на основі аналізу температурних кластерів може сприяти зменшенню навантаження на обладнання та продовженню його експлуатаційного ресурсу.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність застосування фрактально-кластерного аналізу для підвищення ефективності контролю температурних процесів у першому контурі енергоблоку АЕС. Запропонована методика може бути інтегрована в сучасні інформаційно-керуючі системи ПТК АСУ ТП для покращення безпеки та стабільності роботи енергоблоків АЕС.

Висновки

Виявлено, що при досягненні температурного порогу 336°C збільшується ймовірність утворення локальних перегрівів у зонах інтенсивного тепловиділення, що може призвести до розвитку криз тепловіддачі. Запропонований фрактально-кластерний підхід дозволяє підвищити точність моніторингу температурного режиму першого контуру. Використання кластерного аналізу дозволило ідентифікувати аномальні зони нагріву із точністю до 92%. Впровадження автоматизованих алгоритмів корекції температурних флуктуацій дозволяє зменшити амплітуду температурних коливань у першому контурі на 15–20%, що сприяє стабілізації теплових процесів у реакторній установці.

Дослідження показало, що при перевищенні критичної температури 340°C спостерігається збільшення зносу конструкційних матеріалів корпусу реактора на 25%, що вимагає посиленого контролю цих параметрів. Виявлено, що інтеграція методів прогнозного аналізу у систему ПТК АСУ ТП дозволяє своєчасно виявляти можливі порушення циркуляції теплоносія та запобігати аварійним ситуаціям, підвищуючи рівень безпеки експлуатації енергоблоків на 30%.

Отримані результати підтверджують ефективність застосування фрактально-кластерного аналізу для вдосконалення контролю температурних процесів у першому контурі реакторної установки. Використання цієї методики дозволяє не лише зменшити ризики криз тепловіддачі, але й оптимізувати експлуатаційні характеристики реакторного обладнання, забезпечуючи стабільну та безпечну роботу енергоблоку АЕС.

REFERENCES

1. S. Kiss, S. Lipcsei, “Analysis of propagating temperature perturbations in the primary circuit of PWRs,” *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 85, pp. 1167–1174, 2015. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.08.001
2. Y. Xu, H. Jing, L. Xu, Y. Han, L. Zhao, “Microstructural evolution and oxidation behaviour of CF8A austenitic stainless steel during corrosion fatigue in a simulated pressurised water reactor environment,” *Corrosion Science*, Vol. 163, p. 108286, 2020. https://doi.org/10.1016/j.corsci.2019.108286
3. S. M. Mostafavi, G. R. Ansarifar, “Pressurizer water level control with estimation of primary circuit coolant mass in nuclear power plants via robust observer based dynamic sliding mode control,” *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 161, p. 108413, 2021. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108413

4. G. R. Ansarifar, "Control of the nuclear steam generators using adaptive dynamic sliding mode method based on the nonlinear model," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 88, pp. 280–300, 2016. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2015.11.014
5. J. Zhang, H. Xia, Y. Zhu, Y. Fu, "Research on sensor fault tolerance technology in nuclear power plant control system," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 207, p. 110714, 2024. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110714
6. A. A. Amin, K. M. Hasan, "A review of Fault Tolerant Control Systems: Advancements and applications," *Measurement, Vol*. 143, pp. 58–68, 2019. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.04.083
7. T. Guilbaud, C. Fiorina, S. Lorenzi, A. Scolaro, F. Carminati, D. Maire, A. Pautz, "Investigating the Functional Mock-up Interface as a Coupling Framework for the multi-fidelity analysis of nuclear reactors," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 169, p. 105022, 2024. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.105022
8. H. Shao, Z. Gao, X. Liu, K. Busawon, "Parameter-varying modelling and fault reconstruction for wind turbine systems," *Renewable Energy*, Vol. 116(B), pp. 145–152, 2018. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.08.083
9. A. F. Flores, M. Rzehulka, G. Mazzini, "Influence of mixed core in the radionuclides releases and hydrogen production for VVER-1000," *Nuclear Engineering and Design*, Vol. 417, p. 112858, 2024. https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2023.112858
10. J. Bae, G. Kim, S. J. Lee, "Real-time prediction of nuclear power plant parameter trends following operator actions," *Expert Systems with Applications*, Vol. 186, p. 115848, 2021. https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115848
11. A. Baybulatov, A. Poletikin, M. Byvaykov, "NPP Upper Level Control System Databases: The Problem of Making Changes," *17th International Conference on Management of Large-Scale System Development*, pp. 1–5, 2017. https://doi.org/10.1109/MLSD61779.2024.10739603
12. A. Ayodeji, M. Mohamed, L. Li, A. Buono, I. Pierce, H. Ahmed, "Cyber security in the nuclear industry: A closer look at digital control systems, networks and human factors," *Progress in Nuclear Energy*, Vol. 161, p. 104738, 2023. https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2023.104738
13. P. Budanov, E. Khomiak, I. Kyrysov, K. Brovko, S. Kalnoy, O. Karpenko, "Building a model of damage to the fractal structure of the shell of the fuel element of a nuclear reactor," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, Vol. 4(8(118)), pp. 60–70, 2022. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.263374
14. P. Budanov, Yu. Oliinyk, A. Cherniuk, K. Brovko, "Dynamic Fractal Cluster Model of Informational Space Technological Process of Power Station," *Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, Vol. 221, pp. 141–155, 2024. https://doi.org/10.1007/978-3-031-71801-4_11
15. P. Budanov, Yu. Oliinyk, A. Cherniuk, K. Brovko, "Fractal approach for the researching of information emergency features of technological parameters," *AIP Conference Proceedings*, p. 040015, 2024. Iraq, Al-Samawa: Al-Furat Al-Awsat Technical University. https://doi.org/10.1063/5.0191648
16. Z. Chen, H. Wu, Y. Chen, L. Cheng, B. Zhang, "Patrol robot path planning in nuclear power plant using an interval multi-objective particle swarm optimization algorithm," *Applied Soft Computing*, Vol. 116, p. 108192, 2022. https://doi.org/10.1016/j.asoc.2021.108192
17. D. A. Ejigu, X. Liu, "Dynamic modeling and intelligent hybrid control of pressurized water reactor NPP power transient operation," *Annals of Nuclear Energy*, Vol. 173, p. 109118, 2022. https://doi.org/10.1016/j.anucene.2022.109118
18. E. Jharko, E. Abdulova, K. Chernyshov, "Some Aspects of Intelligent Human-Operators Decision Support Systems for NPP," *IFAC-PapersOnLine*, Vol. 55(9), pp. 204–209, 2022. https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.07.036

19. J. Li, M. Lin, Y. Li, X. Wang, "Transfer learning network for nuclear power plant fault diagnosis with unlabeled data under varying operating conditions," *Energy*, Vol. 254(B), p. 124358, 2022. https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124358
20. K. S. Son, J. W. Lee, S. H. Seong, "Study on the digitalization of trip equations including dynamic compensators for the Reactor Protection System in NPPs by using the FPGA," *Nuclear Engineering and Technology*, Vol. 55(8), pp. 2952–2965, 2023. https://doi.org/10.1016/j.net.2023.05.006

Brovko Kostiantyn *Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent;*
V. N. Karazin Kharkiv National University; 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022

Budanov Pavlo *Candidate of Technical Sciences (PhD), Docent;*
V. N. Karazin Kharkiv National University; 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022

Vynokurova Nataliia *assistant lecturer;*
V. N. Karazin Kharkiv National University; 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022

Intelligent system for monitoring the temperature regime of the primary circuit of a nuclear power plant power unit based on fractal-cluster analysis

Actuality. Ensuring the effective and safe operation of nuclear power units requires constant monitoring of the temperature parameters of the primary circuit. Of particular importance is the detection of non-standard coolant operating modes and the prevention of heat transfer crises that can lead to accidents. Modern methods of monitoring the temperature regime do not always take into account the complex spatial structure of thermal processes, which reduces their efficiency. Therefore, there is a need to improve the methods of analyzing the temperature field based on the latest approaches, in particular fractal-cluster analysis.
Purpose. Development and improvement of methods for analyzing the temperature field of the first circuit of the VVER-1000 reactor plant, taking into account fractal-cluster features, to increase the accuracy of monitoring, predict emergency operating modes, and optimize the information and control systems of the software and hardware complex of the automated process control system of the power unit of the nuclear power plant.
Research methods. The work uses fractal analysis methods to study temperature fluctuations in the primary circuit of the reactor. A correlation analysis was conducted to establish the relationship between the coolant temperature and the reactor power level. A comparative analysis of existing temperature monitoring systems was performed with further data generalization and formulation of proposals for the integration of new approaches into information and control systems of nuclear power plants.
Results. A close relationship between the temperature parameters of the coolant and the dynamics of the reactor plant operation was shown. A new monitoring method was proposed that takes into account the cluster structure of thermal processes and allows identifying potential crisis zones in heat transfer. The method provides increased sensitivity to changes in the temperature field and can be used for predictive analysis in real time. The advantages of integrating such an approach into the power unit control system were determined.
Conclusions. The proposed method of fractal-cluster analysis of the temperature field allows increasing the efficiency of control over thermal processes in the first circuit of the power unit of a nuclear power plant. It contributes to increasing the reliability of reactor equipment, reducing the risks of crisis situations, and extending the service life. The results obtained can be used to improve control systems and ensure the overall safety of nuclear power units.

Keywords: *fractal cluster analysis, information and control systems, monitoring, forecasting, nuclear facility safety*

Надійшла у першій редакції 22.02.2025, в останній - 27.03.2025.
The first version has been received on 22.02.2025, the final version - on 27.03.2025.

DOI: https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-03

УДК (UDC) 519.8

Кісельова Олена Михайлівна *Професор, декан факультету прикладної математики та інформаційних технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна, Дніпро, проспект Науки 72, 49045*
e-mail: kiseleva47@ukr.net
https://orcid.org/0000-0003-4303-1707

Кузенков Олександр Олександрович *Доцент, доцент кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, Україна, Дніпро, проспект Науки 72, 49045*
e-mail:kuzenkov1986@gmail.com;
https://orcid.org/ 0000-0002-6378-7993

Про динамічну задачу оптимального розбиття множин з відшуканням координат центрів підмножин

Актуальність. Оптимальне розбиття множин є однією з ключових проблем сучасної прикладної математики та теорії оптимізації, яка знаходить широке застосування в логістиці, інформатиці, біоінженерії, моделюванні складних систем та штучному інтелекті. Особливий інтерес становлять динамічні варіанти задач оптимального розбиття, коли умови задачі змінюються у часі, а розбиття має адаптуватися відповідно до динаміки системи. Оптимальне розбиття множин, в переважній більшості прикладних задач, безпосередньо пов'язано з мінімізацією цільового функціоналу, невід'ємною складовою якого є не тільки контури підмножин але й інші визначальні параметри, що є ключовими для шуканих підмножин. В класичних постановках такими параметрами є, наприклад, центри підмножин. Прикладне застосування задач в такій постановці знаходять своє застосування в економіці, логістиці, медицині, архітектурі та інших галузях.
Мета. Основною метою роботи є постановка однопродуктової динамічної задачі оптимального розбиття множин з відшуканням координат центрів таких підмножин, розробка алгоритму розв'язання динамічної задачі, постановка чисельного експерименту та аналіз отриманих результатів з метою підтвердження їх достовірності.
Методи дослідження. До основних методів дослідження роботи слід віднести методи теорії оптимізації, якісну теорію диференціальних рівнянь та чисельні методи розв'язання задач оптимізації.
Результати. До основних результатів роботи віднесено постановка однопродуктової динамічної задачі оптимального розбиття множин з відшуканням координат центрів таких підмножин, розроблений алгоритм розв'язання задачі, результати чисельного експерименту та результати аналізу отриманих результатів.
Висновки. В статті розглянута нова динамічна задача оптимального розбиття множин з відшуканням координат центрів, розроблено алгоритм розв'язання такої задачі, проведено чисельний експеримент за результатами якого можна вважати отримані результати достовірними та використати для розв'язання практичних задач.
Ключові слова: *динамічна задача, теорія оптимального розбиття множин, цільовий функціонал, фазова траєкторія, чисельні методи.*

Як цитувати: Кісельова О. М., Кузенков О. О. Про динамічну задачу оптимального розбиття множин з відшуканням координат центрів підмножин. Кісельова О. М., Кузенков О. О. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2025. вип. 65. С.33-45. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-03

How to quote: E. Kiseleva, O. Kuzenkov "On the dynamic problem of optimal partitioning of sets with the determination of the coordinates of the subsets' centers", *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 65, pp. 33-45, 2025. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-03 [in Ukrainian]

Вступ

Проблематика оптимального розбиття множин належить до фундаментальних напрямів сучасної прикладної математики та теорії оптимізації, демонструючи високу прикладну значущість у сферах логістики, комп'ютерних наук, біоінженерії, системного моделювання та штучного інтелекту. Особливої актуальності набувають динамічні постановки задач такого типу, в яких параметри системи змінюються у часі, що зумовлює необхідність адаптивного оновлення розбиття відповідно до еволюції системного середовища.

Динамічні задачі оптимального розбиття множин із варіативним розташуванням центрів постають у ситуаціях, коли об'єкти потребують не лише класифікації, а й просторової

© Кісельова О. М., Кузенков О. О., 2025
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

локалізації. Типовим прикладом таких задач є моделювання конкурентної взаємодії мобільних торговельних точок у межах урбанізованого середовища. У подібних сценаріях, окрім запланованих змін цінової політики, пересувні магазини здатні змінювати своє географічне положення з метою підвищення привабливості для споживачів. Такі переміщення безпосередньо впливають на геометрію зон обслуговування. Відтак, зменшення вартості товарів не гарантує приросту клієнтської бази, так само як і підвищення цін не обов'язково спричиняє її скорочення.

У даному дослідженні розглянуто спрощену модель динамічного розбиття множини з урахуванням часової варіації параметрів, таких як вартість транспортування одиниці продукції у контексті нескінченновимірної транспортної задачі. Запропонована модель дозволяє сформулювати узагальнені підходи до аналізу та побудови ефективних алгоритмічних рішень для широкого спектра складніших задач оптимального розбиття. Обґрунтовано доцільність застосування альтернативних (зокрема, гібридних) математичних методів, які поєднують аналітичні та чисельні складові, з метою підвищення ефективності розв'язання задач в умовах високої складності та структурної нестабільності.

Ключова особливість задачі полягає в тому, що навіть при наявності спрощених припущень щодо геометрії множини та характеру змін її внутрішніх властивостей, оптимальне розбиття здатне проявляти складну топологічну організацію. Це зумовлює потребу в розробці спеціалізованих методів аналізу, спрямованих на виявлення умов існування, єдиності та стійкості розв'язків відносно малих збурень у вхідних параметрах. Зазначений підхід дозволяє, як поглиблено дослідити структурну поведінку систем зі змінною конфігурацією, так і сконструювати практично придатні алгоритмічні процедури з контрольованою обчислювальною складністю.

Отримані результати мають потенціал практичного застосування у формалізації моделей для задач кластеризації, оптимального розподілу ресурсів, мережевого планування та адаптивного керування в умовах невизначеності або змінних зовнішніх впливів.

Огляд публікацій з тематики дослідження.

Ключові теоретичні засади сучасної теорії оптимального розбиття множин у різноманітних постановках було закладено в численних дослідженнях професорки О.М. Кісельової та представників її наукової школи. Основу цих досліджень становлять строгі математичні формалізації задачі та аналітичні підходи до їх розв'язання, зокрема, детально висвітлені в працях [1], [7]. У зазначених роботах запропоновано чіткі постановки модельних задач, розроблено ефективні алгоритми їх розв'язання та наведено результати багаточисельних комп'ютерних експериментів, що підтверджують теоретичні висновки.

У працях [2]–[5] здійснено системний аналіз глобальних аспектів задач теорії оптимального розбиття множин. У цих дослідженнях сформульовано та доведено низку принципових теорем, які, зокрема, дозволяють звести нескінченновимірні задачі до їх скінченновимірних аналогів, а також переходити від задач із обмеженнями до еквівалентних задач без обмежень.

Особливу увагу приділено динамічним формулюванням задач, які розглядаються в роботі [3]. У ній проаналізовано специфіку постановки таких задач, розроблено алгоритмічне забезпечення для їх розв'язання та представлено чисельні результати, що ілюструють ефективність запропонованих методів. Значну увагу приділено прикладним аспектам, зокрема обмеженням, що виникають у реальних задачах, та методам наближеного розв'язання в разі відсутності точного аналітичного підходу.

У роботах [4], [6], [8] досліджено неперервно-дискретні задачі, специфіка яких зумовлена наявністю додаткових умов як у самій постановці, так і в алгоритмах їх реалізації. Автори пропонують як універсальні, так і спеціалізовані підходи, які дозволяють одержувати чисельні або, в ряді випадків, аналітичні розв'язки задач даного класу.

Серед праць зарубіжних дослідників, що здійснили вагомий внесок у формування фундаменту теорії оптимального розбиття множин, слід виокремити роботи G. Buttazzo, G. Dal Maso, F. Santambrogio, B. Bourdin. Зокрема, у дослідженні [9] оптимальні розбиття аналізуються в межах варіаційного підходу та теорії міри. У цій роботі сформульовано загальні умови існування оптимального розбиття в задачах мінімізації енергетичних функціоналів з урахуванням геометричних, об'ємних або мірових обмежень.

У працях [10]–[11] розглянуто задачі мінімізації (максимізації) сум перших власних значень оператора Лапласа на підмножинах простору, що мають застосування в контексті моделей дифузії, фазових переходів і кластеризації.

Попри розвинену аналітичну базу, значна частина сучасних досліджень орієнтована на розробку чисельних методів розв'язання задач оптимального розбиття. Зокрема, у роботах [12]–[13] запропоновано застосування методів рівневих множин, підходів топологічної оптимізації, а також релаксаційних і регуляризаційних технік.

Неперервні задачі розбиття органічно вписуються в парадигму нескінченновимірного математичного програмування завдяки: варіаційному формулюванню функціоналів цілі; нескінченновимірним обмеженням (наприклад, умовам на міру, геометрію або крайові значення); застосуванню методів субдиференціального аналізу та узагальненого спряженого програмування [14].

Серед актуальних напрямів подальших досліджень у галузі теорії оптимального розбиття множин вирізняються: аналіз задач із нечітко визначеною геометрією або стохастичними параметрами; вивчення багатокритеріальних розбиттів, що виникають у прикладних задачах екології, медицини, кібербезпеки; а також розробка підходів до оптимізації функціоналів на просторах ймовірнісних мір у контексті машинного навчання [15].

Отже, на сучасному етапі теорія неперервних задач оптимального розбиття множин є інтегрованим напрямом нескінченновимірного програмування, який поєднує глибоку аналітичну складову, складність алгоритмічної реалізації та широку прикладну застосовність — від задач механіки до проблем штучного інтелекту. Подальший розвиток теорії потребує як розширення її фундаментальної основи (вивчення існування, стійкості, збіжності, похибок, складності), так і вдосконалення прикладних інструментів її чисельної реалізації.

Математична постановка однопродуктової динамічної задачі оптимального розбиття множин з відшуканням координат центрів підмножин.

Розглянемо неперервну однопродуктову динамічну задачу оптимального розбиття множин з E_n без обмежень з відшуканням координат центрів підмножин у такому вигляді.

Нехай Ω – обмежена замкнена вимірна за Лебегом множина в *n*–вимірному евклідовому просторі E_n. Сукупність вимірних за Лебегом підмножин $\Omega_1,...,\Omega_N$ множини $\Omega \subset E_n$ (серед яких можуть бути і порожні) назвемо можливим розбиттям цієї множини, якщо $\bigcup_{i=1}^{N}\Omega_i = \Omega,\ \ \mathrm{mes}(\Omega_i \bigcap \Omega_j) = 0,\ \ i, j = 1,...,N \quad (i \neq j)$, де $N > 0$ – задане натуральне число; $\mathrm{mes}(\cdot)$ – міра Лебега.

Позначимо через $\sum_{\Omega}^{N}$ клас всіх можливих розбиттів множини $\Omega \subset E_n$ на задану кількість N її вимірних за Лебегом підмножин:

$$\sum_{\Omega}^{N} = \{\varpi \equiv \{\Omega_1,...,\Omega_N\} \in \Omega^N :\ \bigcup_{i=1}^{N}\Omega_i = \Omega,\ \ \mathrm{mes}(\Omega_i \bigcap \Omega_j) = 0,$$
$$i, j = 1,...,N\ (i \neq j)\}.$$

Далі, через $\tau = (\tau_1,...,\tau_N)$ позначимо сукупність деяких еталонних точок для підмножин $\Omega_1,...,\Omega_N$ відповідно, які назвемо центрами цих підмножин: $\tau_i = (\tau_i^{(1)},...,\tau_i^{(n)}) \in \Omega_i,\ i = 1,...,N$, і будемо вважати, що координати усіх центрів невідомими та такими, що підлягають знаходженню.

Постановка задачі. Знайти розбиття $\varpi = \{\Omega_1,...,\Omega_N\} \in \sum_{\Omega}^{N}$ множини $\Omega \subset E_n$, векторну функцію $c(x,\tau,t) = (c_1(x,\tau_1,t),...,\ \ c_N(x,\tau_N,t))$, визначену м.в. для $x \in \Omega$, координати центрів $\tau = \{\tau_1,...,\tau_N\} \subset \Omega^N$ та всіх $t \in [0,\ T]$, які забезпечують

$$\inf_{\overline{\varpi} \in \sum_{\Omega}^{N};\{\tau_1,...,\tau_N\} \subset \Omega^N; c(\cdot,\cdot,\cdot) \in L_2^N(\Omega \times \Omega \times [0,T])} F(\overline{\varpi},\tau,c(\cdot,\cdot,\cdot)) \tag{1}$$

де

$$F(\overline{\varpi},\tau,c(\cdot,\cdot,\cdot)) = \int_0^T \sum_{i=1}^{N} \int_{\Omega_i} \left(c_i(x,\tau_i,t) \cdot m(x,\tau_i) + a_i\right)\rho(x)dxdt \tag{2}$$

за наявності умов

$$\frac{\partial c_i(x,\tau_i,t)}{\partial t} = \sum_{j=1}^{N} A_{ij} \cdot f_j(c_j(x,\tau_j,t)), \quad 0 \le t \le T;$$
$$c_i(x,\tau_i,t_0) = c_{0i}(x,\tau_i), \quad i = 1,...,N, \tag{3}$$

м.в. для $x \in \Omega$ та умови замкненості системи

$$\sum_{i=1}^{N} A_{ij} = 1, \quad j = 1,...,N\ . \tag{4}$$

Тут $\tau = \{\tau_1,...,\tau_N\} \subset \Omega^N$ - шукані центри підмножин з координатами $\tau_i = (\tau_i^{(1)},...,\tau_i^{(n)}) \in \Omega, i = 1,...,N$; $c_i(x,\tau_i,t),\ i = 1,...,N$, – шукані дійсні функції, визначені на $\Omega \times \Omega \times [0,T]$, що є неперервно диференційованими за аргументом t на відрізку $[0,T]$ м.в. для $x = (x^{(1)},...,x^{(n)}) \in \Omega$, обмежені та вимірні за аргументом x на Ω для всіх $t \in [0,\ T]$; $m(x,\tau_i)$, $c_{0i}(x,\tau_i)$ – задані дійсні функції, визначені на $\Omega \times \Omega$, обмежені та вимірні за аргументом $x \in \Omega$ (зокрема, $m(x,\tau_i)$ може відігравати роль метрики на $\Omega \times \Omega$); $f_i(c_i(x,\tau_i,t)),\ i = 1,...,N$, – задані дійсні функції, неперервні та ліпшицеві в області свого визначення; $\rho(x)$ – задана невід'ємна функція, обмежена та вимірна на Ω; $a_i,\ i = 1,...,N$, – задані, як правило, невід'ємні числа; $0 \le A_{ij} \le 1,\ i,j = 1,2,...,N$, – задані числові параметри; $T > 0$ та $t_0 \in [0,\ T]$ задані.

Тут та в подальшому інтеграли розуміються в сенсі Лебега. Будемо вважати, що міра множини межових точок підмножин $\Omega_1,...,\Omega_N$ дорівнює нулю.

Трійку $\left(\overline{\omega}^*, \tau^*, c^*(x,\tau,t)\right)$, що доставляє функціоналу (2) мінімальне значення на множині $\sum_{\Omega}^{N} \times L_2^N(\Omega \times \Omega \times [0,T])$ за умов (3), (4), назвемо оптимальним розв'язком задачі (1)–(4). При цьому розбиття $\varpi^* = \{\Omega_1^*,...,\Omega_N^*\} \in \sum_{\Omega}^{N}$ назвемо оптимальним розбиттям множини $\Omega \subset E_n$ на N підмножин, $\tau^* = \{\tau_1^*,...,\tau_N^*\} \subset \Omega^N, \tau_i^* = (\tau_i^{*(1)},...,\tau_i^{*(n)}), i = 1,...,N$ оптимальними центрами та їх координатами відповідно, а векторну функцію $c^*(x,\tau,t) = (c_1^*(x,\tau_1,t),...,$ $c_N^*(x,\tau_N,t)) \in L_2^N(\Omega \times \Omega \times [0,T])$ – оптимальною фазовою траєкторією динамічної системи в задачі (1)–(4).

З предметної точки зору, незалежна змінна $t \in [0,\ T]$ у наведеній математичній постановці динамічної задачі оптимального розбиття може відігравати роль часової змінної, а $T > 0$ та $t_0 \in [0,\ T]$ – задані кінцевий та початковий моменти часу у досліджуваному динамічному процесі відповідно. Так, функції $f_i(c_i(x,\tau_i,t))$, i = 1,2,…,N, у диференціальних зв'язках (3), що відображають динаміку цін на транспортування, можуть мати різний вигляд, в залежності від предметного змісту, який в неї вкладається, наприклад: моделі інфляції/дефляції; моделі односторонньої цінової регуляції; моделі двосторонньої цінової регуляції; моделі дотаційної односторонньої цінової регуляції.

В якості базової в наступних пунктах буде використана модель інфляції/дефляції, для наочної демонстрації кращої оптимізації цільового функціоналу в однопродуктовій динамічній задачі оптимального розбиття множин з відшуканням координат центрів підмножин.

Обґрунтування методу розв'язання

Нехай $\{\Omega_1,...,\Omega_N\} \in \sum_{\Omega}^{N}$ – деяке можливе розбиття вихідної замкненої обмеженої вимірної множини $\Omega \subset E_n$ на N її вимірних за Лебегом підмножин, що не перетинаються.

Введемо у розгляд на множині $\Omega \subset E_n$ характеристичні функції $\lambda_1(x),...,\lambda_N(x)$ підмножин $\Omega_1,...,\Omega_N$ відповідно:

$$\lambda_i(x) = \begin{cases} 1, x \in \Omega_i, \\ 0, x \in \Omega \setminus \Omega_i, \end{cases} \quad i = 1,...,N \tag{5}$$

і переформулюємо задачу (1)–(4) у термінах характеристичних функцій підмножин у більш зручному вигляді. Потрібно знайти векторні функції $\lambda^*(x)=(\lambda_1^*(x),...,\lambda_N^*(x)),\ x\in\Omega$, $c^*(x,\tau,t)=(c_1^*(x,\tau_1,t),...,c_N^*(x,\tau_N,t)),\ x\in\Omega, t\in[0,\ T]$ та координати центрів $\tau^*=\{\tau_1^*,...,\tau_N^*\}\subset\Omega^N$, які забезпечують

$$\inf_{\lambda(\cdot)\in\Gamma_1;\{\tau_1,...,\tau_N\}\subset\Omega^N;c(\cdot,\cdot,\cdot)\in L_2^N(\Omega\times\Omega\times[0,T])} J(\lambda(\cdot),\tau,c(\cdot,\cdot,\cdot)) \tag{6}$$

де функціонал $J(\lambda(\cdot),\tau,c(\cdot,\cdot,\cdot))$ має вигляд

$$J(\lambda(\cdot),\tau,c(\cdot,\cdot,\cdot))=\int_0^T\sum_{i=1}^N\int_\Omega(c_i(x,\tau_i,t)\cdot m(x,\tau_i)+a_i)\rho(x)\lambda_i(x)dxdt, \tag{7}$$

$$\begin{aligned}&\Gamma_1=\{\lambda(x)=(\lambda_1(x),...,\lambda_N(x)):\sum_{i=1}^N\lambda_i(x)=1 \quad м.в. \quad для \quad x\in\Omega;\\ &\lambda_i(x)=0\vee 1 \quad м.в. \quad для \quad x\in\Omega, i=1,...,\mathrm{N}\}\end{aligned} \tag{8}$$

за умов (3)-(4). Очевидно, що для функціонала $F(\overline{\omega},\tau,c(\cdot,\cdot,\cdot))$ виду (2) і функціонала $J(\lambda(\cdot),\tau,c(\cdot,\cdot,\cdot))$ виду (7) виконується рівність $J(\lambda(\cdot),\tau,c(\cdot,\cdot,\cdot))=F(\overline{\omega},\tau,c(\cdot,\cdot,\cdot))$.

Далі від задачі (6)–(8) за умов (3)–(4) з булевими значеннями функцій $\lambda_i(\cdot), i=1,...N$, перейдемо до відповідної задачі зі значеннями $\lambda_i(\cdot), i=1,...N$, що змінюються на відрізку $[0,1]$.

Задача. Знайти векторні функції $\lambda^*(x)=(\lambda_1^*(x),...,\lambda_N^*(x)),\ x\in\Omega$ і $c^*(x,\tau,t)=(c_1^*(x,\tau_1,t),...,c_N^*(x,\tau_N,t))$, $x\in\Omega$, $\tau=\{\tau_1,...,\tau_N\}\subset\Omega^N$, $t\in[0,\ T]$, які забезпечують

$$\inf_{\lambda(\cdot)\in\Gamma;\{\tau_1,...,\tau_N\}\subset\Omega^N;c(\cdot,\cdot,\cdot)\in L_2^N(\Omega\times\Omega\times[0,T])} J(\lambda(\cdot),\tau,c(\cdot,\cdot,\cdot)) \tag{9}$$

де функціонал $J(\lambda(\cdot),\tau,c(\cdot,\cdot,\cdot)$ має вигляд

$$J(\lambda(\cdot),\tau,c(\cdot,\cdot,\cdot))=\int_0^T\sum_{i=1}^N\int_\Omega(c_i(x,\tau_i,t)\cdot m(x,\tau_i)+a_i)\rho(x)\lambda_i(x)dxdt, \tag{10}$$

$$\begin{aligned}&\Gamma=\{\lambda(x)=(\lambda_1(x),...,\lambda_N(x)):\sum_{i=1}^N\lambda_i(x)=1 \quad м.в. \quad для \quad x\in\Omega;\\ &0\le\lambda_i(x)\le 1 \quad м.в. \quad для \quad x\in\Omega, i=1,...,\mathrm{N}\}\end{aligned} \tag{11}$$

за умов (3)-(4).

Перша компонента $\lambda^*(x)=(\lambda_1^*(x),...,\lambda_N^*(x))$ оптимального розв'язку такої задачі м.в. для $x\in\Omega$ і для кожного $i=1,...,N$ має вигляд

$$\lambda_i^*(x)=\begin{cases}1, якщо \quad виконується \quad умова \quad (13)\\ 0, в \quad іншому \quad випадку\end{cases} \tag{12}$$

$$\int_0^T(c_i(x,\tau_i,t)\cdot m(x,\tau_i)+a_i)\rho(x)dt=\min_{k=\overline{1,N}}\left(\int_0^T(c_k(x,\tau_k,t)\cdot m(x,\tau_k)+a_k)\rho(x)dt\right) \tag{13}$$

при заданих $\tau_i\in\Omega_i,\ i=\overline{1,N}$

Алгоритм розв'язання однопродуктової динамічної задачі оптимального розбиття множин з розміщенням центрів підмножин.

Запропонований алгоритм однопродуктової динамічної задачі оптимального розбиття множин з розміщенням центрів підмножин базується на одному з варіантів методу загального градієнтного спуску з розтягненням простору в напрямку різниці двох послідовних загальних градієнтів (r-алгоритм), спрямований в загальному випадку на пошук локальних мінімумів недиференційованої багатоекстремальної цільової функції

$$G(\tau)=\int_0^T\int_{\Omega_i}\inf_{k=1,2,...,N}(c_i(x,t)\cdot m(x,\tau_k)+a_k)\,p(x)dxdt\to\inf$$

$$\tau\in\Omega^N\subset\underbrace{E_n\times...\times E_n}_{N}$$

Необхідно визначити і-ту компоненту вектора субградієнту $g_G^{\tau}(\tau)=(g_G^{\tau_1}(\tau),...,g_G^{\tau_i}(\tau),...,g_G^{\tau_N}(\tau))$ функції

$$G(\tau_1^{(1)},...,\tau_1^{(n)};...;\tau_i^{(1)},...,\tau_i^{(n)};...;\tau_N^{(1)},...,\tau_N^{(n)})=$$

$$=\int_0^T\int_G\inf_{i=1,...,N}c_i(x^{(1)},...,x^{(n)};t)\cdot m(x^{(1)},...,x^{(n)};\tau_i^{(1)},...,\tau_i^{(n)})\cdot\rho(x^{(1)},...,x^{(n)})dx^{(1)}...dx^{(n)}dt$$

в точці $\tau=(\tau_1^{(1)},...,\tau_N^{(n)})$ наступним чином:

$$g_G^{\tau_i}(\tau)=g_G^{\tau_i}(\tau_1^{(1)},...,\tau_N^{(n)})=\int_0^T\int_G c_i(x^{(1)},...,x^{(n)};t)\times g_m^{\tau_i}(x^{(1)},...,x^{(n)};\tau_i^{(1)},...,\tau_i^{(n)})\times$$
$$\times\lambda_i(x^{(1)},...,x^{(n)})\times p(x^{(1)},...,x^{(n)})dx^{(1)}...dx^{(n)}dt,\ i=1,2,...N \qquad (14)$$

де $g_m^{\tau_i}(x,\tau)$ - і-та компонента N – мірного вектора субградієнту $g_M^{\tau}(x,\tau)$ функції $m(x,\tau_i)$ в точці $\tau=(\tau_1,...,\tau_i,...,\tau_N)$.

Для розв'язання задачі r-алгоритмом у B-формі включаємо область Ω у *n*-вимірний паралелепіпед П, сторони якого паралельні осям декартової системи координат. Для простоти вважатимемо $p(x)=1$ для $x\in\Pi\setminus\Omega$. Паралелепіпед П покриваємо прямокутною сіткою та переходимо до основного етапу.

Основний етап

Крок 1. Обираємо початкове наближення $\tau=\tau^{(0)}$ та коефіцієнт розтягу простору $\alpha>1$. Покласти $B_0^{\tau}=I_n$.

Крок 2. Задаємо значення функцій $c_{0i}(x),\ i=1,...,N$, з початкових умов (3) в вузлах сітки, та покриваємо відрізок $[0,T]$ сіткою з кроком h_t.

Крок 3. Для кожного вузла сітки розв'язуємо задачу Коші для системи ЗДР (3) на часовому відрізку $[0,T]$ та знаходимо функції $c_i^{(k)}(x,t),\ i=1,...,N$.

Крок 4. Обчислюємо значення $\lambda^{(k)}(x)$ вузлах сітки за формулами (5) коли $\tau=\tau^{(k)}$.

Крок 5. Обчислюємо $g_G(\tau)$ – за формулою (14) коли $\lambda(x)=\lambda^{(k)}(x),\tau=\tau^{(k)}$.

Крок 6. Обчислюємо ξ_k^{τ} за формулою $\xi_k^{\tau}=\dfrac{(B_k^{\tau})^T g_G(\tau)}{\left\|(B_k^{\tau})^T g_G(\tau)\right\|}$ при $\tau=\tau^{(k)}$.

Крок 7. Розраховуємо $\tau=\tau^{(k+1)}$ за формулою $\tau^{k+1}=P_{\Pi}(\tau^k-h_kB_k^{\tau}\xi_k^{\tau})$

де P_{Π} - оператор проектування на П.

Крок 8. Для кожного вузла сітки розв'язуємо задачу Коші для системи ЗДР (3) на часовому відрізку $[0,T]$ та знаходимо функції $c_i^{(k+1)}(x,t),\ i=1,...,N$.

Крок 9. Обчислюємо значення $\lambda^{(k+1)}(x)$ вузлах сітки за формулами (5) коли $\tau=\tau^{(k+1)}$.

Крок 10. Обчислюємо $g_G(\tau)$ – за формулою (14) коли $\lambda(x)=\lambda^{(k+1)}(x),\tau=\tau^{(k+1)}$.

Крок 11. Обчислити

$$\eta_k^\tau = \frac{(B_k^\tau)^T r_k^\tau}{\left\|(B_k^\tau)^T r_k^\tau\right\|}, \quad r_k^\tau = g_G(\tau^{(k+1)}) - g_G(\tau^{(k)})$$

$$R_\beta(\eta_k^\tau) = I_n + (\beta - 1)\eta_k^\tau(\eta_k^\tau)^T, \quad \beta = \frac{1}{\alpha} < 1$$

$$B_{k+1} = B_k^\tau R_\beta(\eta_k^\tau)$$

Крок 12. Якщо умова

$$\left\|\tau^k - \tau^{k+1}\right\| \le \varepsilon, \ \varepsilon > 0 \tag{15}$$

не виконується, вважаємо *k:=k+1* і переходимо до кроку 6, в іншому випадку переходимо до кроку 13.

Крок 13. Вважаємо $\lambda_*(x) = \lambda^{(n)}(x), c_*(x,t) = c^{(n)}(x,t)$, $\tau_* = \tau^{(n)}$, де *n* – номер ітерації на якій виконалась умова (15).

Крок 14. Розраховуємо оптимальне значення цільового функціоналу по формулі

$$G(\tau) = \int_0^T \int_\Omega \inf_{i=1,2,\dots,N} (c_i(x,t) \cdot m(x,\tau_i) + a_i)\, p(x)\, dx dt$$

при $\tau = \tau_*$

Алгоритм розв'язання неперервної однопродуктової динамічної задачі оптимального розбиття множин з E_n без обмежень з розміщенням центрів підмножин описаний.

Розв'язання модельних задач та оцінка чисельних результатів

Описана вище неперервна однопродуктова динамічна задача оптимального розбиття множин з E_n без обмежень з відшуканням кординат центрів підмножин з моделлю інфляції/дефляції у якості базової була розв'язана для різних модельних задач, для яких виконується обмеження (4), та початкові умови системи диференціальних рівнянь (3). Модельні задачі є нескінченновимірними задачами розбиття заданої області з відшуканням кординат центрів виробництва/постачання, що виробляють однорідну продукцію для розподілення в цій області із заданою щільністю споживачів.

Модельна задача 1.

Споживачі деякої однорідної продукції, що виробляється двома підприємствами, неперервно розподілені в області $\Omega = \{x = (x^{(1)}, x^{(2)}):\ 0 \le x^{(1)} \le 1;\ 0 \le x^{(2)} \le 1\}$, кількість підприємств постачання продукції дорівнює 2, координати оптимального розміщення підприємств τ_1, τ_2 невідомі та підлягають визначенню. Для двох підприємств задана система відповідно до якої змінюється ціна на транспортування одиниці продукції на одиницю відстані

$$\begin{cases} \dfrac{\partial c_1(x,\tau_1,t)}{\partial t} = A_{11} \cdot d_1 \cdot c_1(x,\tau_1,t) + (1 - A_{22}) \cdot d_2 \cdot c_2(x,\tau_2,t) \\ \dfrac{\partial c_2(x,\tau_2,t)}{\partial t} = (1 - A_{11}) \cdot d_1 \cdot c_1(x,\tau_1,t) + A_{22} \cdot d_2 \cdot c_2(x,\tau_2,t) \end{cases}, \quad 0 \le t \le T, \tag{16}$$

з початковими умовами

$$c_1^0 = 2,\ c_1^0 = 1 \tag{17}$$

В цій та наступних модельних задачах у якості $m(x,\tau_i)$ використана евклідова метрика.

Розв'язок задачі (16)-(17) описує вартість транспортування одиниці продукції з і-го підприємства до споживача з координатами (x, y). Відомий попит $\rho(x, y)$ на продукцію для

кожного пункту споживання з координатами (x, y). Для простоти вважається $\rho(x, y) \equiv 1, \forall x \in \Omega$.

Множину споживачів можна розбити на зони обслуговування $\Omega_i, i = 1,2$ споживачів і-им пунктом виробництва так, щоб

$$\bigcup_{i=1}^{2} \Omega_i = \Omega, \qquad mes(\Omega_i \cap \Omega_k)_{i \neq k} = 0, \qquad i, k = 1,2 \tag{18}$$

Для випадку $N = 2$ формулу (18) можна було б записати в більш простому вигляді, проте у наступних модельних задачах значення N прийматиме значення >2, а відповідні умови залишатимуться у наведеному аналітичному вигляді. Зазначимо, що потужність і-го підприємства $i = 1,2$ дорівнює сумарному попиту споживачів, що належать Ω_i, i=1,2.

Необхідно розбити множину споживачів Ω так, що б мінімізувати функціонал (1), (2), (6) сумарних витрат на виробництво продукції та її доставку до споживача при умовах (3), (4) та $N = 2$.

Для розв'язання сформульованої задачі область Ω була покрита прямокутною сіткою з вузлами (i, j), $i = 1,...,101$, $j = 1,...,101$. Було отримано чисельний розв'язок системи (16), для якого був використаний метод Рунге-Кути 4-го порядку. Пошук розв'язку системи (16) було здійснено при h_t=0,001, а для отриманих точок фазової траєкторії при $T = [0,5;1;1,5;2;3;5;10]$ було розраховано вартість транспортування від кожного вузла (i, j) області Ω до центрів τ_1, τ_2. Виходячи з критерію мінімальної вартості вузол (i, j) був віднесений до областей Ω_1 та Ω_2 відповідно. Результати чисельного експерименту наведені на рис.1 (а-ж).

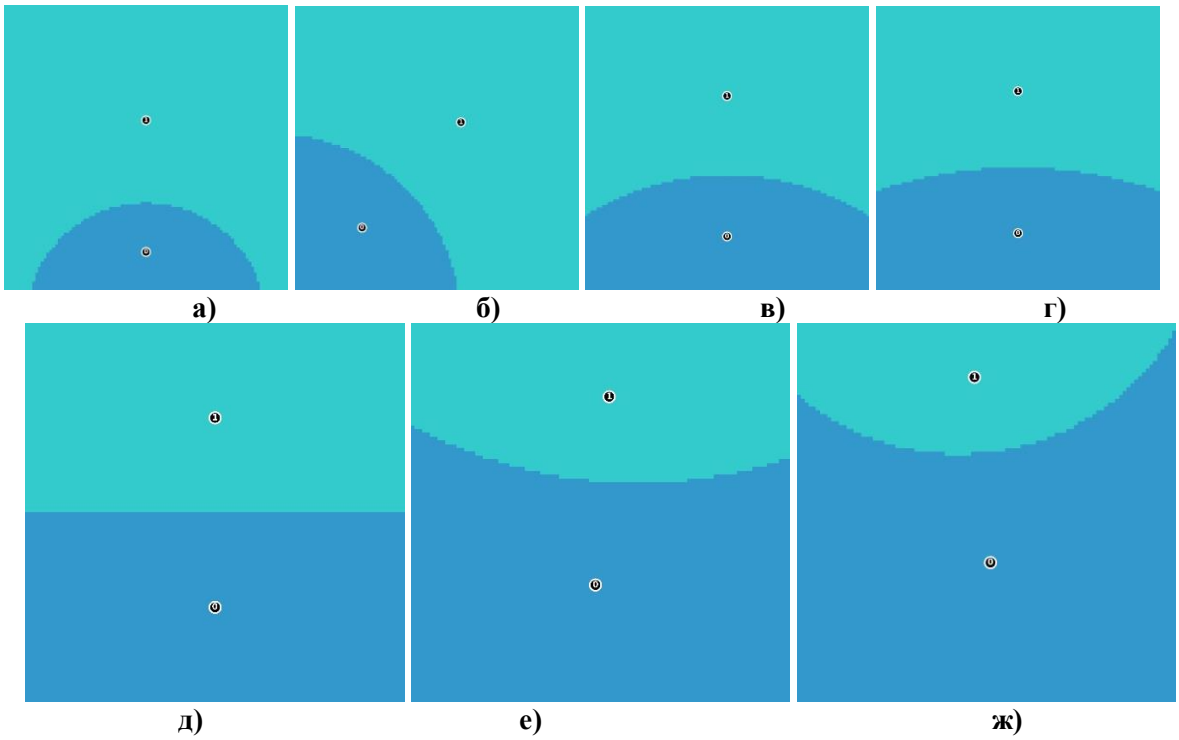


Рис.1 – Результати розбиття множини Ω, що має форму квадрата зі стороною 1, на дві підмножини з початковими центрами $\tau_1^0(0,5;0,25)$, $\tau_2^0(0,5;0,75)$, $\Delta x = \Delta y = 0,01$, $A_{11} = A_{22} = 0,5$, $d_1 = 1$, $d_2 = 1,5$ та а) $T = 0,5$, б) $T = 1$, в) $T = 1,5$, г) $T = 2$, д) $T = 3$, е) $T = 5$, ж) $T = 10$ та іншими параметрами наведеними в таблиці 1.

Fig. 1 – Results of partitioning a set Ω shaped as a square with a side length of 1 into two subsets with initial centers at $\tau_1^0(0,5;0,25)$, $\tau_2^0(0,5;0,75)$, $\Delta x = \Delta y = 0,01$, $A_{11} = A_{22} = 0,5$, $d_1 = 1$, $d_2 = 1,5$ and a) $T = 0,5$, b) $T = 1$, c) $T = 1,5$, d) $T = 2$, e) $T = 3$, f) $T = 5$, g) $T = 10$, and other parameters listed in Table 1.

Таблиця 1 – Розгорнуті параметри числового експерименту наведеного на рис.1
Table 1 – Detailed parameters of the numerical experiment shown in Fig. 1

Рис.1	Часовий проміжок	Кількість ітерацій	Значення цільового функціоналу	Оптимальні координати центрів τ_i підмножин Ω_i
а)	[0; 0,5]	24	0,2321	τ_1 = (0,5; 0,134); τ_2 = (0,5; 0,596)
б)	[0; 1]	38	0,5613	τ_1 = (0,236; 0,22); τ_2 = (0,585; 0,591)
в)	[0; 1,5]	28	1,0484	τ_1 = (0,5; 0,189); τ_2 = (0,5; 0,684)
г)	[0; 2]	31	1,6763	τ_1 = (0,5; 0,2); τ_2 = (0,5; 0,7)
д)	[0; 3]	0	3,5395	τ_1 = (0,5; 0,25); τ_2 = (0,5; 0,75)
е)	[0; 5]	29	11,4382	τ_1 = (0,487; 0,309); τ_2 = (0,523; 0,806)
ж)	[0; 10]	29	112,7064	τ_1 = (0,51; 0,368); τ_2 = (0,468; 0,857)

Кожне з наведених на рис.1 а)-ж) розбиття ілюструє оптимальне розміщення центрів при заданих параметрах моделі та значеннях вартості перевезення одиниці продукції для кожного з центрів τ_i. Як бачимо, навіть при симетричній формі області Ω розміщення центрів не завжди є симетричним відповідно одне одного. У випадку рис.1-а) вартість транспортування для центру $\tau_1 = 2$, що вдвічі більше вартості для центру τ_2. Це зумовлює нерівномірний розподіл споживачів між двома центрами. Проте, варто зазначити, що початкові координати центрів для першого ж кроку розв'язку системи (3) набули скорегованих значень τ_1 = (0,5; 0,1337); τ_2 = (0,5; 0,5956). Результати такого корегування суттєвим чином вплинули на значення цільового функціоналу. В абсолютних значеннях така відмінність не відчутна, проте, у відносних показниках значення цільового функціоналу зменшилось більш ніж на 5%.

Модельна задача 2.

Вхідні дані аналогічні модельній задачі 1, за винятком того, що кількість центрів обрана рівними трьом, а їх взаємне розташування є відносно симетричним відносно меж області Ω $\tau_1^0(0{,}2;0{,}5)$, $\tau_2^0(0{,}5;0{,}7)$, $\tau_3^0(0{,}85;0{,}85)$. Крім того, крок прямокутної сітки встановлено на рівні 0,01, що, зокрема, позитивно впливає на точність обчисленого розв'язку. Параметри $d_1 = 1; d_2 = 2; d_3 = 3$ підібрані таким чином, що, на відміну від попередньої модельної задачі, зменшується відносна різниця у швидкості зміни вартості транспортування. Проте при цьому вартість транспортування для третього центру вже втричі перевищує відповідну вартість для першого. Така конфігурація параметрів зумовлює швидше відхилення фазової траєкторії від стаціонарної точки початку координат, і вже при $T = 2$ чітко простежується перевага першого центру порівняно з центрами τ_2 та τ_3.

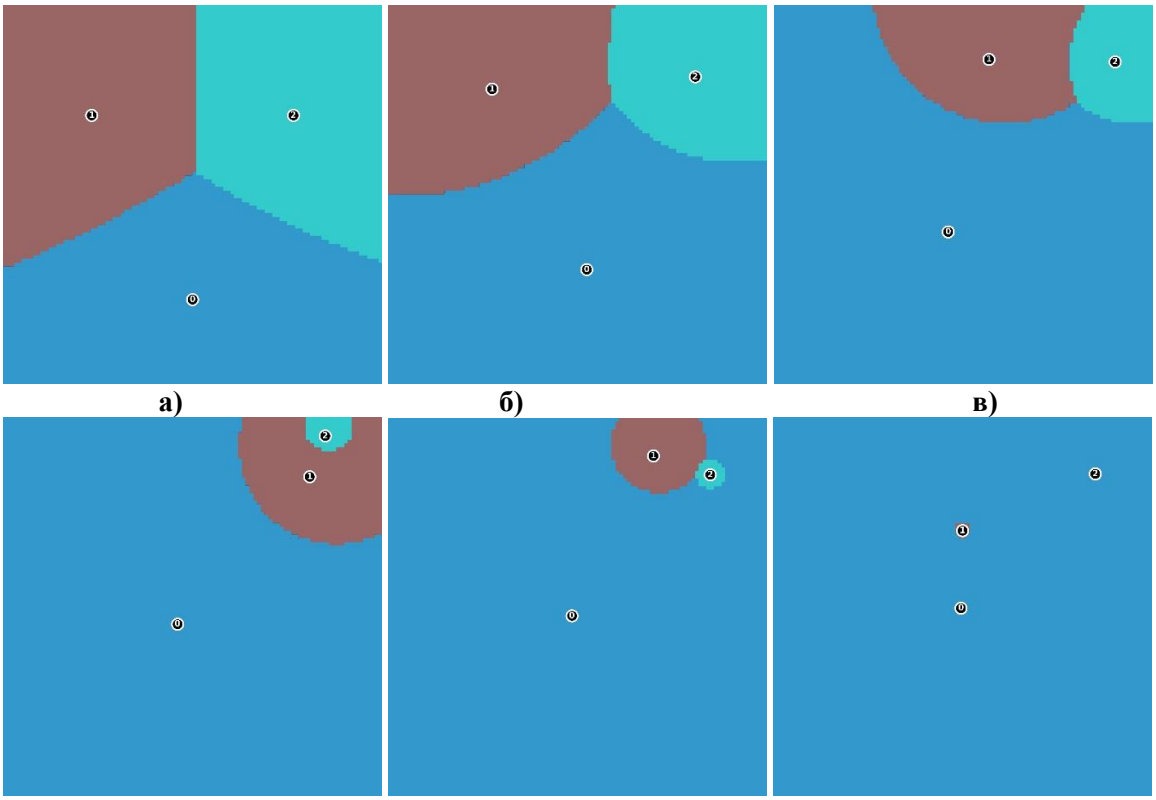


Рис.2 Результати розбиття множини Ω, що має форму квадрата зі стороною 1, на три підмножини з початковими центрами $\tau_1^0(0{,}2;0{,}5)$, $\tau_2^0(0{,}5;0{,}7)$, $\tau_3^0(0{,}85;0{,}85)$, $\Delta x = \Delta y = 0{,}01$, $A_{11} = A_{22} = A_{33} = 1$, $d_1 = 1$, $d_2 = 2$, $d_3 = 3$ та а) $T = 0{,}5$, б) $T = 1$, в) $T = 1{,}5$, г) $T = 2$, д) $T = 3$, е) $T = 5$ та іншими параметрами наведеними в таблиці 3.7.

Fig. 2 – Results of partitioning a set shaped as a square with a side length of 1 into three subsets with initial centers at $\tau_1^0(0{,}2;0{,}5)$, $\tau_2^0(0{,}5;0{,}7)$, $\tau_3^0(0{,}85;0{,}85)$, $\Delta x = \Delta y = 0{,}01$, $A_{11} = A_{22} = A_{33} = 1$, $d_1 = 1$, $d_2 = 2$, $d_3 = 3$ and a) $T = 0{,}5$, b) $T = 1$, c) $T = 1{,}5$, d) $T = 2$, e) $T = 3$, f) $T = 5$, and other parameters listed in Table 2.

Таблиця 2 – Розгорнуті параметри числового експерименту наведеного на рис.2
Table 2 – Detailed parameters of the numerical experiment shown in Fig. 2

Рис.2	Часовий проміжок	Кількість ітерацій	Значення цільового функціоналу	Оптимальні координати центрів τ_i підмножин Ω_i
а)	[0;0,5]	38	0,239	τ_1 = (0,5; 0,223); τ_2 = (0,234; 0,709); τ_3 = (0,766; 0,709)
б)	[0;1]	38	0,742	τ_1 = (0,525; 0,302); τ_2 = (0,274; 0,778); τ_3 = (0,81; 0,81)
в)	[0;1,5]	39	1,677	τ_1 = (0,46; 0,401); τ_2 = (0,567; 0,856); τ_3 = (0,9; 0,85)
г)	[0;2]	37	3,042	τ_1 = (0,46; 0,454); τ_2 = (0,809; 0,843); τ_3 = (0,85; 0,95)
д)	[0;3]	30	8,136	τ_1 = (0,485; 0,477); τ_2 = (0,7; 0,9); τ_3 = (0,85; 0,85)
е)	[0;5]	20	39,972	τ_1 = (0,496; 0,496); τ_2 = (0,5; 0,7); τ_3 = (0,85; 0,85)

На відміну від попередньої модельної задачі в модельній задачі 2 кількість центрів дорівнює трьом. Початкове розміщення центрів підмножин не є симетричним відносно меж області Ω, проте є достатньо рівномірним відносно одне одного. Як бачимо на рис.2 а)-е) таке взаємо розміщення центрів не зберігається та обумовлено, та обумовлює мінімальне значення цільового функціоналу.

Висновки

У роботі сформульовано та досліджено безперервну однопродуктову динамічну задачу оптимального розбиття множини без обмежень, з одночасним визначенням координат центрів підмножин. Проведено аналіз існуючих підходів, методів і алгоритмів, що застосовуються для розв'язання задач такого типу. Розглянуто математичні моделі, які можуть бути використані для формалізації правил зміни вартості транспортування, з наведенням відповідних прикладних обґрунтувань. Серед кількох можливих моделей було обрано найпростіший варіант – модель інфляції/дефляції, яка стала основою для побудови й аналізу двох модельних задач. Для кожної задачі отримано розв'язки систем диференціальних рівнянь, які були використані для обчислення вартості транспортування на різних часових інтервалах. Оптимальне розбиття здійснювалося за різної кількості центрів, з різним просторовим розташуванням як між собою, так і відносно меж заданої області. Результати чисельного експерименту мають виразне прикладне значення та отримали інтерпретацію в контексті практичних задач. Загалом, результати свідчать про високу адекватність запропонованої моделі.

Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розширенні підходу для використання інших базових моделей, а також на модифікації задачі з урахуванням обмежень на розміщення центрів і їх пропускну здатність.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kiseleva E. M. The emergence and formation of the theory of optimal set partitioning for sets of the n-dimensional Euclidean space. Theory and application // *Journal of Automation and Information Sciences*. – 2018. – Vol. 50, № 9. – P. 1–24. – DOI: 10.1615/jautomatinfscien.v50.i9.10.
2. Кісельова О. М. Становлення та розвиток теорії оптимального розбиття множин. Теоретичні і практичні застосування : монографія / О. М. Кісельова. – Дніпро : Ліра, 2018. – 532 с.
3. Kiseleva E. M., Koriashkina L. S., Shevchenko T. A. Solving the dynamic optimal set partitioning problem with arrangement of centers of subsets // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2014. – Vol. 50, № 6. – P. 842–853. – DOI: 10.1007/s10559-014-9675-8.
4. Kiseleva E., Prytomanova O., Hart L. Solving a Two-stage Continuous-discrete Problem of Optimal Partitioning-Allocation with the Subsets Centers Placement // *Open Computer Science*. – 2020. – Vol. 10. – P. 124–136. –URL: https://www.degruyter.com/view/journals/comp/10/1/article-p124.xml.
5. Kiseleva E. M., Shor N. Z. Continuous problems of optimal set partitioning: theory, algorithms, applications / E. M. Kiseleva, N. Z. Shor. – К. : Наукова думка, 2005. – 564 p.
6. Kiseleva E. M., Prytomanova O. M., Us S. A. Solving a two-stage continuous-discrete optimal partitioning-distribution problem with a given position of the subsets centers // *Cybernetics and Systems Analysis*. – 2020. – Vol. 56, № 1. – P. 3–15. – DOI: 10.1007/s10559-020-00215-y.
7. Kiseleva E. M. Solution of the problem of optimal partitioning including allocation of the centers of gravity of the Subsets // *Computational Mathematics and Mathematical Physics*. – 1989. – Vol. 29, № 3. – P. 47–56. – DOI: 10.1016/0041-5553(89)90146-8.
8. Kiseleva E., Hart L., Prytomanova O., Kuzenkov O. An algorithm to construct generalized Voronoi diagrams with fuzzy parameters based on the theory of optimal partitioning and neuro-fuzzy technologies // *Workshop Proceedings of the 8th International Conference on "Mathematics. Information Technologies. Education", MoMLeT&DS-2019*, Shatsk, Ukraine, June 2–4, 2019. – P. 148–162. – URL: https://ceur-ws.org/Vol-2386/paper12.pdf.
9. Buttazzo G., Dal Maso G. An existence result for a class of shape optimization problems // *Archive for Rational Mechanics and Analysis*. – 1993.

10. Caffarelli L., Lin F.-H. An optimal partition problem for eigenvalues // *Journal of Scientific Computing*. – 2007.
11. Conti M., Terracini S., Verzini G. On a class of optimal partition problems related to the Fucik spectrum and to the monotonicity formulae // *Calculus of Variations and Partial Differential Equations*. – 2005.
12. Burger M., Hackl B., Ring W. Incorporating topological derivatives into level set methods // *Journal of Computational Physics*. – 2004.
13. Amstutz S., Novotny A. A. Topological optimization of structures. – Berlin : Springer, 2010.
14. Rockafellar R. T. *Convex Analysis* / R. T. Rockafellar. – Princeton University Press, 1973. – DOI: 10.1017/S0013091500010142.
15. Dumas A., Santambrogio F. Optimal trajectories in L1 and under L1 penalizations // *Comptes Rendus. Mathématique*. – 2024. – Vol. 362, Issue G6. – P. 657–692.

REFERENCES

1. E. M. Kiseleva, "The emergence and formation of the theory of optimal set partitioning for sets of the n-dimensional Euclidean space. Theory and application," *J. Autom. Inf. Sci.*, vol. 50, no. 9, pp. 1–24, 2018. doi: 10.1615/jautomatinfscien.v50.i9.10
2. O. M. Kiselova, *Stanovlennia ta rozvytok teorii optymalnoho rozbyttia mnozhyn. Teoretychni i praktychni zastosuvannia: monohrafiia*. Dnipro, Ukraine: Lira, 2018. [in Ukrainian]
3. E. M. Kiseleva, L. S. Koriashkina, and T. A. Shevchenko, "Solving the dynamic optimal set partitioning problem with arrangement of centers of subsets," *Cybern. Syst. Anal.*, vol. 50, no. 6, pp. 842–853, 2014. doi: 10.1007/s10559-014-9675-8
4. E. Kiseleva, O. Prytomanova, and L. Hart, "Solving a two-stage continuous-discrete problem of optimal partitioning-allocation with the subsets centers placement," *Open Comput. Sci.*, vol. 10, pp. 124–136, 2020. Available: https://www.degruyter.com/view/journals/comp/10/1/article-p124.xml
5. E. M. Kiseleva and N. Z. Shor, *Continuous Problems of Optimal Set Partitioning: Theory, Algorithms, Applications*. Kyiv, Ukraine: Naukova Dumka, 2005.
6. E. M. Kiseleva, O. M. Prytomanova, and S. A. Us, "Solving a two-stage continuous-discrete optimal partitioning-distribution problem with a given position of the subsets centers," *Cybern. Syst. Anal.*, vol. 56, no. 1, pp. 3–15, 2020. doi: 10.1007/s10559-020-00215-y
7. E. M. Kiseleva, "Solution of the problem of optimal partitioning including allocation of the centers of gravity of the subsets," *Comput. Math. Math. Phys.*, vol. 29, no. 3, pp. 47–56, 1989. doi: 10.1016/0041-5553(89)90146-8
8. E. Kiseleva, L. Hart, O. Prytomanova, and O. Kuzenkov, "An algorithm to construct generalized Voronoi diagrams with fuzzy parameters based on the theory of optimal partitioning and neuro-fuzzy technologies," in *Proc. 8th Int. Conf. Mathematics. Information Technologies. Education (MoMLeT&DS-2019)*, Shatsk, Ukraine, Jun. 2–4, 2019, pp. 148–162. [Online]. Available: https://ceur-ws.org/Vol-2386/paper12.pdf
9. G. Buttazzo and G. Dal Maso, "An existence result for a class of shape optimization problems," *Arch. Ration. Mech. Anal.*, 1993.
10. L. Caffarelli and F.-H. Lin, "An optimal partition problem for eigenvalues," *J. Sci. Comput.*, 2007.
11. M. Conti, S. Terracini, and G. Verzini, "On a class of optimal partition problems related to the Fucik spectrum and to the monotonicity formulae," *Calc. Var. Partial Differ. Equ.*, 2005.
12. M. Burger, B. Hackl, and W. Ring, "Incorporating topological derivatives into level set methods," *J. Comput. Phys.*, 2004.
13. S. Amstutz and A. A. Novotny, *Topological Optimization of Structures*. Berlin, Germany: Springer, 2010.
14. R. T. Rockafellar, *Convex Analysis*. Princeton, NJ, USA: Princeton Univ. Press, 1973. doi: 10.1017/S0013091500010142
15. A. Dumas and F. Santambrogio, "Optimal trajectories in L1 and under L1 penalizations," *Comptes Rendus Math.*, vol. 362, no. G6, pp. 657–692, 2024.

Kiseleva Elena Mikhailivna *Professor, Dean of the Faculty of Applied Mathematics and Information Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine, Dnipro, 72 Nauky Avenue, 49045*
e-mail: kiseleva47@ukr.net
https://orcid.org/0000-0003-4303-1707

Kuzenkov Oleksandr Oleksandrovich *Associate Professor, Associate Professor of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Cybernetics, Oles Honchar Dnipro National University, Ukraine, Dnipro, 72 Nauky Avenue, 49045*
e-mail:kuzenkov1986@gmail.com;
https://orcid.org/ 0000-0002-6378-7993

On the Dynamic Problem of Optimal Set Partitioning with Determination of Subset Center Coordinates

Relevance. Optimal set partitioning is one of the key problems in modern applied mathematics and optimization theory, with wide-ranging applications in logistics, computer science, bioengineering, complex systems modeling, and artificial intelligence. Of particular interest are dynamic variants of set partitioning problems, where the conditions of the problem change over time, and the partitioning must adapt to the evolving system dynamics. In the vast majority of applied problems, optimal set partitioning is directly linked to the minimization of an objective functional, which inherently depends not only on the shapes or contours of the subsets but also on other defining parameters that are crucial for determining the desired subsets. In classical formulations, such parameters often include the centers of the subsets. Practical applications of problems in this form arise in economics, logistics, medicine, architecture, and other areas of human activity.
Objective. The main goal of this study is to formulate a single-product dynamic optimal set partitioning problem with the determination of the coordinates of the centers of the resulting subsets, to develop an algorithm for solving the dynamic problem, to conduct a numerical experiment, and to analyze the obtained results in order to confirm their reliability.
Methods. The primary research methods used in this work include optimization theory techniques, qualitative theory of differential equations, and numerical methods for solving optimization problems.
Results. The main results of the study include the formulation of a single-product dynamic optimal set partitioning problem with determination of subset center coordinates, the development of a solution algorithm, the outcomes of the numerical experiment, and the analysis of the results obtained.
Conclusions. This article presents a novel dynamic optimal set partitioning problem with determination of subset center coordinates. An algorithm for solving the problem is proposed, and a numerical experiment is conducted. The results confirm the validity of the proposed approach and demonstrate its potential applicability to solving real-world problems.
Keywords: *dynamic problem, optimal set partitioning theory, objective functional, phase trajectory, numerical methods*.

Надійшла у першій редакції 27.02.2025, в останній - 01.04.2025.
The first version has been received on 27.02.2025, the final version - on 01.04.2025.

DOI: https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-04

УДК (UDC) 004.4:005.8:005.3

Лисицький Костянтин Євгенович — *к.т.н., доцент, доцент кафедри математичного моделювання та аналізу даних; Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків-22, Україна, 61022; e-mail: constantin.lisickiy@karazin.ua;* **https://orcid.org/0000-0002-7772-3376**

Солдатенко Денис Сергійович — *студент; Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 4, Харків-22, Україна, 61022; e-mail: soldatenko2020ks13@student.karazin.ua;* **https://orcid.org/0009-0001-0486-0265**

Моделювання структури ролей в системі управління проєктними завданнями

Актуальність. У сучасних інформаційних системах управління проєктами чітке структурування ролей є критично важливим для ефективної організації командної роботи. Методології Scrum, XP та DSDM передбачають розподіл повноважень і доступу до ресурсів відповідно до функціональних ролей учасників. Це особливо актуально в умовах масштабних проєктів із багаторівневою структурою доступу, де правильне моделювання ролей сприяє підвищенню продуктивності, безпеки та контрольованості процесів розробки. Недостатня формалізація ролей може призвести до дублювання функцій, конфліктів у командах та зниження загальної ефективності управління. Тому розробка гнучкої та адаптивної моделі розподілу ролей є важливим етапом при створенні сучасних систем планування та контролю завдань.
Мета. Метою статті є моделювання структури ролей у системі управління проєктними завданнями з урахуванням основних методологій управління проєктами, таких як Scrum, XP, DSDM. У статті аналізуються ключові ролі та обов'язки в рамках кожної з цих методологій, а також порівняння цих моделей з точки зору їх придатності для системи планування задач. Крім того, стаття має на меті дослідити, яка з моделей є найбільш оптимальною для організації задач у системах з багаторівневим доступом.
Методи дослідження. Порівняльний аналіз, моделювання.
Результати. Проведено порівняльний аналіз трьох методологій управління проєктами — Scrum, XP та DSDM — з метою визначення їхньої ефективності в контексті побудови системи управління завданнями. На основі структури ролей, запропонованої у Scrum, розроблено багаторівневу модель розподілу ролей у команді, яка враховує рівень кваліфікації кожного учасника. Запропоновану модель було вдосконалено шляхом введення додаткових ролей, що дало змогу краще адаптувати систему до реальних умов роботи сучасних IT-команд. Для кожної ролі були визначені зони відповідальності та рівні доступу до функціоналу системи, що дозволяє забезпечити гнучке керування процесами, підвищену безпеку та зручну масштабованість. Окрему увагу приділено деталізації ролей розробників залежно від їхнього професійного рівня (молодший, середній, старший), що позитивно впливає на ефективність командної взаємодії, контроль якості виконаних завдань та процес наставництва у команді.
Висновки. Розроблено модель структури ролей у системі управління проєктними завданнями на основі Scrum з урахуванням розширень, що відповідають реаліям сучасної IT-індустрії. Визначено вплив кожної ролі на функціонування системи управління та виявлено, що саме поєднання базових ролей Scrum з додатковими спеціалізованими ролями дозволяє формувати стійку багаторівневу систему, здатну адаптуватися до змін середовища проєкту.

Ключові слова: *роль, структура ролей, система управління завданнями, Agile-методології, права доступу.*

Як цитувати: Лисицький К. Є., Солдатенко Д. С. Моделювання структури ролей в системі управління проєктними завданнями. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2025. вип. 65. С. 46-56. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-04

How to quote: Lysytskyi K. Y., Soldatenko D. S. “ Modeling the structure of roles in a project task management system”, *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 65, pp. 46-56, 2025. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-05[in Ukrainian]

1 Вступ

У сучасних умовах розвитку інформаційних технологій системи управління проєктами відіграють ключову роль у забезпеченні ефективної організації колективної праці [1]. Все більше компаній та команд переходять до використання проєктно-орієнтованого підходу, де важливою складовою стає чіткий розподіл обов’язків, визначення зон відповідальності та контроль за

© Лисицький К. Є., Солдатенко Д. С., 2025
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

виконанням завдань. Саме тому структура ролей у таких системах має суттєве значення для підтримки дисципліни, ефективної комунікації та керованості робочих процесів.

Однією з основних вимог до сучасної системи управління проєктними задачами є гнучкість у визначенні прав доступу до інформації, інструментів та функціоналу відповідно до ролі, яку виконує користувач у рамках проєкту [2]. Це дозволяє не лише забезпечити безпечне середовище для виконання завдань, а й оптимізувати розподіл навантаження, зменшуючи кількість помилок, дублювання функцій та конфліктів у команді.

Сьогодні існує низка підходів до формування командної структури у проєктному середовищі, кожен з яких пропонує власну модель ролей та принципи взаємодії. Вибір тієї чи іншої моделі значною мірою залежить від розміру команди, специфіки задач, рівня формалізації процесів та організаційної культури. Проте, незалежно від методології, чітке моделювання ролей залишається критичним фактором для досягнення прозорості в управлінні, підвищення продуктивності та адаптивності до змінних умов середовища [3].

У цій статті основну увагу приділено вивченню підходів до побудови структур ролей у командній роботі, аналізу переваг та обмежень наявних моделей, а також визначенню принципів, які дозволяють забезпечити баланс між централізованим контролем та автономією учасників проєкту. Дослідження спрямоване на формування концептуальної моделі, що може бути використана при розробці програмних систем планування задач у багаторівневому командному середовищі.

2 Теоретичні засади моделювання ролей в управлінні проєктами

Управління проєктами як комплексна дисципліна охоплює широкий спектр діяльності, спрямованої на досягнення визначених цілей у встановлені терміни та з урахуванням наявних ресурсів. Однією із фундаментальних ознак ефективного управління є чітке визначення та розподіл відповідальності між учасниками проєктної команди [4]. Саме тут на перший план виходить концепція ролі.

У контексті управління проєктами, роль являє собою не просто формальну посаду, а скоріше динамічний набір очікувань, поведінки, компетенцій та обов’язків, які асоціюються з конкретною функцією або завданням у рамках проєкту. Визначення ролі передбачає окреслення того, що повинна робити людина, як вона повинна це робити, та який рівень відповідальності вона несе за результати своєї діяльності [4, 5]. На відміну від статичної посадової інструкції, роль може змінюватися залежно від фази проєкту, поточних потреб команди та індивідуальних навичок учасників.

У сучасних системах управління проєктами, особливо тих, що базуються на Agile-методологіях, концепція ролі часто тісно пов’язана з принципами самоорганізації та крос-функціональності команд. У таких підходах ролі можуть бути менш ієрархічними та більш орієнтованими на співпрацю та спільне досягнення цілей [6]. Ефективне моделювання ролей у цих контекстах вимагає не лише визначення обов’язків, але й урахування необхідних компетенцій, стилів комунікації та здатності до командної роботи.

Таким чином, концепція ролі в контексті управління проєктами є фундаментальним елементом для побудови ефективних та гнучких організаційних структур. Чітке розуміння сутності ролі, її відмінностей від посади та її значення для комунікації, відповідальності та прийняття рішень є критично важливим для успішної реалізації проєктів будь-якої складності.

3 Аналіз структур ролей в основних методологіях управління проєктами

Сучасні методології управління проєктами, що належать до сімейства Agile, пропонують відмінні від традиційних підходів структури ролей у проєктних командах. У цьому розділі буде проведено детальний аналіз моделей ролей, що використовуються в трьох ключових Agile-методологіях: Scrum, Extreme Programming (XP) та Dynamic Systems Development Method (DSDM), з особливим акцентом на їхніх обов'язках та рівнях доступу в контексті систем управління проєктними завданнями.

Розуміння цих моделей є важливим кроком для подальшого порівняльного аналізу та моделювання оптимальної структури ролей для систем з багаторівневим доступом.

3.1 Модель ролей в Scrum

У основі Scrum-команди знаходяться три ключові ролі, кожна з яких виконує певні функції для забезпечення успішної розробки продукту.

Власник Продукту (Product Owner) є відповідальним формування та управління беклогом продукту, що означає визначення, пріоритезацію та уточнення елементів беклогу. Він також бере участь у плануванні релізів та ітерацій (спринтів), визначаючи цілі спринту та елементи беклогу, які будуть реалізовані в рамках поточного спринту. Крім того, власник продукту є основним комунікатором між командою розробників та зацікавленими сторонами, такими як клієнти, користувачі або керівництво. Він збирає їхні потреби, враховує відгуки та формує їх у вимоги до продукту. Наприкінці кожного спринту власник продукту перевіряє виконану роботу та приймає або відхиляє результати, переконуючись, що робота відповідає визначеним критеріям прийняття [7].

Щодо рівня доступу в системі управління проєктними завданнями, власник продукту, як правило, має найвищі права. Він повинен мати повний доступ на читання та редагування беклогу продукту, включаючи можливість створювати нові елементи, змінювати їх пріоритетність, деталізувати описи тощо. Він також має доступ до інструментів планування спринтів, щоб визначати цілі спринту та обирати елементи беклогу для включення. Для відстеження прогресу, власник продукту має доступ до інформації про стан виконання завдань, оцінки складності та будь-які блокувальні фактори. Крім того, він може залишати коментарі та надавати зворотний зв'язок безпосередньо в системі, а також мати доступ до звітів та аналітики.

Скрам-майстер (Scrum Master) виступає в ролі керівника та менеджера для скрам-команди, допомагаючи їй працювати ефективно та дотримуватися принципів Scrum. Його обов'язки включають планування спринту, щоденні скрам-мітинги, огляд спринту та ретроспектива спринту. Він також відповідає за усунення будь-яких перешкод, які заважають команді досягати цілей спринту, чи то технічні проблеми, або організаційні питання. Крім того, скрам-майстер бере під свою опіку команду, навчаючи її принципам Scrum та допомагаючи самоорганізовуватися та вдосконалювати свої внутрішні процеси [7].

Щодо рівня доступу, скрам-майстер зазвичай має повний доступ на читання беклогу продукту та спринту, щоб розуміти контекст роботи команди. Він може мати можливість редагувати статус завдань, щоб відображати їхній поточний стан, та додавати коментарі для комунікації та фіксації інформації. Скрам-майстер також має доступ до інструментів планування спринтів та може переглядати звіти та метрики, щоб виявляти потенційні проблеми та сприяти вдосконаленню.

Команда Розробників (Development Team) є групою професіоналів, які відповідають за фактичну розробку та поставку продукту наприкінці кожного спринту. Scrum не визначає внутрішніх ролей у команді розробників, оскільки розподіл обов’язків між учасниками здійснюється відповідно до рішень компанії або керівництва, з урахуванням навичок і досвіду кожного фахівця [7].

Рівень доступу для команди розробників у системі управління проєктними завданнями забезпечує їм можливість ефективно виконувати свою роботу. Це включає повний доступ на читання беклогу спринту, можливість оновлювати статус завдань, за які вони відповідають, можливість оцінювати складність завдань та додавати коментарі для комунікації. За потреби, члени команди можуть мати можливість створювати підзадачі для кращого управління своєю роботою та доступ до пов'язаної документації.

3.2 Модель ролей в Extreme Programming (XP)

В основі XP-команди знаходяться кілька ключових ролей, які забезпечують ефективну розробку програмного забезпечення.

Замовник (Customer) в XP відіграє ключову роль, бувши безпосередньо залученим до процесу розробки. Його основні обов'язки включають визначення функціональних вимог до системи у формі історій користувачів, встановлення пріоритетів цих історій для кожної ітерації, а також надання зворотного зв'язку команді розробників щодо розробленого програмного забезпечення. Замовник бере активну участь у плануванні ітерацій, визначаючи, які історії користувачів будуть реалізовані [8].

Щодо рівня доступу в системі управління проєктними завданнями, замовник має можливість переглядати всі історії користувачів, їхні описи, критерії прийняття та поточний статус виконання. Він також має можливість додавати нові історії користувачів та змінювати їхній пріоритет. Замовник повинен мати доступ до інформації про прогрес команди, бачити, які історії користувачів знаходяться в розробці, які завершені, а які ще не розпочаті. У деяких системах

замовнику може бути надано право формально приймати або відхиляти завершені історії користувачів.

Програміст (Programmer) є іншою ключовою роллю, яка відповідальна за проєктування, розробку та тестування програмного коду. Однією з рис XP є практика парного програмування, коли двоє програмістів працюють разом за одним комп'ютером над однією задачею. Це сприяє обміну знаннями, підвищенню якості коду та зменшенню кількості помилок. Програмісти також беруть активну участь у плануванні ітерацій, оцінюючи складність історій користувачів та розбиваючи їх на конкретні завдання. Вони несуть відповідальність за постійну інтеграцію коду та проведення тестування [8].

Щодо рівня доступу, програмісти мають повний доступ на читання всіх елементів беклогу, можливість оновлювати статус завдань, за які відповідають, оцінювати складність завдань та додавати коментарі. Оскільки XP заохочує спільну роботу, всі програмісти в парі можуть мати однакові права на редагування коду та пов'язаних з ним завдань у системі управління проєктними завданнями. Вони також можуть мати можливість створювати нові завдання, що виникають у процесі розробки, та пов'язувати їх з відповідними історіями користувачів.

Тренер (Coach) в XP виконує роль, схожу на Скрам-майстра в Scrum, але з більшим акцентом на технічні практики. Його обов'язки включають навчання команди практикам XP (таким як парне програмування, тестування через розробку, рефакторинг, безперервна інтеграція), полегшення комунікації та співпраці в команді, а також допомогу у розв’язанні проблем. Тренер також стежить за дотриманням принципів XP та сприяє постійному вдосконаленню процесів [8].

Щодо рівня доступу, Тренер зазвичай має повний доступ на читання всієї проєктної інформації, включаючи беклог, плани ітерацій, статуси завдань та звіти про прогрес. Він може мати можливість редагувати статуси завдань, додавати коментарі та нотатки, а також використовувати інструменти для візуалізації прогресу команди. Його рівень доступу спрямований на забезпечення прозорості та підтримку ефективної роботи команди.

Відстежувач (Tracker) є роллю, відповідальною за збір та аналіз метрик проєкту. Його обов'язки включають збір даних про швидкість команди, час виконання завдань, кількість помилок та інші важливі показники. Відстежувач використовує ці дані для виявлення тенденцій, прогнозування майбутнього прогресу та надання зворотного зв'язку команді для поліпшення процесів [8].

Щодо рівня доступу, відстежувач має доступ на читання всіх даних, необхідних для збору метрик, включаючи статуси завдань, оцінки, журнали роботи тощо. Він також має доступ до інструментів для генерації звітів та аналізу даних. Він не має прав на редагування основних елементів беклогу або завдань, але його доступ сфокусований на отриманні інформації для моніторингу та аналізу роботи команди.

3.3 Модель ролей в Dynamic Systems Development Method (DSDM)

DSDM визначає низку ролей, які можна умовно поділити на бізнес-ролі та технічні ролі, а також ролі, що забезпечують управління та підтримку процесу.

Бізнес-спонсор (Business Sponsor) є ключовою бізнес-роллю, яка забезпечує фінансування та підтримку проєкту на високому рівні. Його основні обов'язки включають визначення бізнес-цілей проєкту, забезпечення наявності необхідних ресурсів та прийняття ключових бізнес-рішень. Бізнес-спонсор не є щоденним учасником розробки, але його підтримка є критично важливою для успіху проєкту [9, 10].

Щодо рівня доступу в системі управління проєктними завданнями, бізнес-спонсор зазвичай має високорівневий доступ до інформації про проєкт, включаючи бізнес-вимоги, плани, прогрес, звіти про витрати тощо. Він може мати можливість затверджувати ключові рішення та зміни в проєкті, а також переглядати загальну аналітику проєкту.

Бізнес-амбасадор (Business Ambassador) представляє потреби кінцевих користувачів та бізнес-інтереси на щоденній основі. Його обов'язки включають надання детальних вимог, участь у пріоритезації функціональності, надання зворотного зв'язку щодо розробленого програмного забезпечення та участь у приймальному тестуванні. Бізнес-амбасадор є активним членом команди розробки [9, 10].

Щодо рівня доступу, бізнес-амбасадор має повний доступ на читання та редагування вимог, можливість їх пріоритезації, а також можливість залишати коментарі та надавати зворотний

зв'язок щодо завдань розробки. Він також має доступ до інформації про прогрес розробки та результати тестування.

Технічний координатор (Technical Coordinator) відповідає за забезпечення технічної узгодженості проєкту, підтримку архітектури системи, контроль якості коду. Він є лідером технічної команди та забезпечує прийняття технічних рішень [10].

Щодо рівня доступу, технічний координатор має повний доступ до всієї технічної інформації в системі управління проєктними завданнями, включаючи завдання розробки, технічну документацію, архітектурні рішення, результати тестування та метрики якості коду. Він має право редагувати технічні завдання, встановлювати стандарти та контролювати їхнє дотримання.

Лідер команди (Team Leader) відповідає за щоденне управління командою розробки, планування завдань, моніторинг прогресу, розв’язання проблем та забезпечення ефективної комунікації всередині команди [9, 10].

Щодо рівня доступу, лідер команди має повний доступ на читання всієї інформації, пов'язаної з роботою команди, включаючи вимоги, завдання, статуси, коментарі та прогрес. Він має можливість редагувати статуси завдань, призначати завдання членам команди, керувати планом роботи команди та генерувати звіти про прогрес.

Розробник (Developer) відповідає за проєктування, розробку, тестування та інтеграцію програмного коду. Як і в Scrum, команда розробників в DSDM є крос-функціональною та самоорганізованою [9, 10].

Щодо рівня доступу, розробники мають повний доступ на читання вимог та завдань, за які вони відповідають, можливість оновлювати їхній статус, додавати коментарі та створювати підзадачі. Вони також мають доступ до пов'язаної технічної документації та інструментів розробки.

Крім цих основних ролей, DSDM також може включати інші ролі, такі як *Тестувальник (Tester)*, який відповідає за планування та проведення тестування, документування дефектів та верифікацію їх виправлення [9, 10]. Його рівень доступу в системі управління проєктними завданнями включатиме можливість переглядати вимоги, створювати та редагувати тестові сценарії та випадки, фіксувати результати тестування та відстежувати статус дефектів.

Інтегратор (Integrator) відповідає за об'єднання різних компонентів системи, розроблених окремими членами команди, та забезпечення їхньої сумісної роботи [10]. Його рівень доступу може включати права на перегляд та редагування інформації про компоненти системи, залежності між ними та результати інтеграційного тестування

Фасилітатор (Facilitator) відповідає за організацію та проведення ефективних зустрічей та воркшопів [10]. Його рівень доступу може включати можливість планування зустрічей у системі, фіксування прийнятих рішень та відстеження виконання домовленостей. Кожна з цих ролей матиме відповідний рівень доступу до системи управління проєктними завданнями, що чітко корелює з їхніми обов'язками та потребами в інформації для ефективного виконання покладених на них функцій у проєкті.

4 Порівняльний аналіз моделей ролей для систем управління проєктними завданнями

Згідно з дослідженням Zippia, 71% компаній вже впровадили Agile-методології, що демонструє зростаючу популярність цих методів у сфері розробки програмного забезпечення. Це свідчить про те, що все більше організацій обирають гнучкі підходи до управління проєктами, прагнучи досягти більшої ефективності, адаптивності та швидкості реагування на зміни у вимогах. Крім того, великий успіх Agile-методологій можна побачити у відсотках досягнутих результатів: 64% таких проєктів виявляються успішними, а 60% з них забезпечують зростання доходів компаній [11].

Таблиця 1. Відсоток впровадження різних Agile-методологій серед компаній
Table 1. Percentage of implementation of various Agile methodologies among companies

Фреймворк	Частка впровадження (%)
Scrum	66%
Scrumban	9%
XP Hybrid	9%
Kanban	6%
Iterative	4%
Інші	5%

Згідно з даними в таблиці 1, Scrum є найбільш популярною Agile-методологією, з часткою впровадження 66% [12]. Такий показник є свідченням того, що Scrum не лише широко застосовується в галузі розробки програмного забезпечення, але й демонструє універсальність у реалізації проєктів різного масштабу та складності.

Для порівняння, такі методології як XP Hybrid та Scrumban мають частку впровадження лише по 9%, що свідчить помітно меншу популярність. Хоча вони й мають свої переваги, зокрема в умовах тісної співпраці з клієнтом, вони не демонструють такої ж широкої застосовності, як класичний Scrum. Значно меншу частку займає група інших методологій, включаючи такі як DSDM, які разом становлять приблизно 5%. Це може пояснюватися специфічною спрямованістю цих фреймворків на управління ризиками та змінами, що робить їх менш універсальними та складнішими в інтеграції в стандартні процеси розробки.

Таблиця 2. Переваги, недоліки та приклади застосування Agile-фреймворків
Table 2. Advantages, disadvantages and examples of Agile frameworks application

Фреймворк	**Сфера застосування**	**Переваги**	**Недоліки**
Scrum	Розробка продуктів, зокрема: медичні додатки, вебзастосунки, ігри, розважальні сервіси	Різні ролі сприяють самоуправлінню. Щоденні зустрічі Scrum допомагають відслідковувати призначення завдань. Ретроспективи спринтів усувають слабкі місця і сприяють наданню рекомендацій.	Успіх проєкту залежить від професіоналів та експертів процесу Scrum. Власник продукту та клієнти повинні мати достатньо знань і досвіду роботи з процесом Scrum. Відсутність покриття системних тестів.
XP	Підходить для малих або середніх проєктів, проєктів, які вимагають тісної співпраці між командою розробників і клієнтом. Наприклад, пошукова система Google, веб-сервіси Amazon.	Якість коду та продуктивність покращуються завдяки функції рефакторингу.	Залучення клієнта займає багато часу, що може призвести до стресу. Немає підтримки для розподілених команд, тому потрібне навчання для членів команди.
DSDM	Краще підходить для управління проєктами, контролю ризиків, технік розробки. Наприклад, для розробки фінансових додатків.	Забезпечує швидку розробку додатків, сприяє управлінню проєктами, контролю ризиків та технікам розробки.	Проблеми з адмініструванням під час розробки, не враховує критичність проєкту, немає конкретних вказівок щодо розміру команди та довжини ітерацій.

Згідно з даними в таблиці 2, Scrum є найбільш ефективним фреймворком для побудови системи управління задачами, зокрема завдяки чітко визначеним ролям [13].. Порівняно з XP, де акцент зміщено на безпосередню взаємодію та спільну роботу. Ця ясність у визначенні ролей є ключовою перевагою при проєктуванні багаторівневої системи управління задачами, оскільки дозволяє точно відобразити ієрархію доступу та повноважень. На відміну від DSDM, який хоч і враховує управління змінами та ризиками, проте не надає такого ж рівня деталізації у визначенні прав та обов'язків ролей у контексті виконання конкретних завдань, Scrum забезпечує більш практичну основу для побудови системи управління.

Щодо аналізу ефективності фреймворків, то було використано результати кількісного опитування фахівців галузі інформаційних технологій. Дані, наведені в таблиці 3, базуються на оцінках учасників, зібраних через структуровану анкету. Респонденти — проєктні менеджери, розробники, Scrum-майстри, бізнес-аналітики — представляли понад 30 компаній, які працюють

у сфері розробки ПЗ. Було враховано різноманітні типи проєктів: від стартапів до масштабних корпоративних систем. Респонденти оцінювали рівень задоволення основними аспектами управління проєктом: вартістю, часом, ризиками, якістю та управлінням людськими ресурсами. Отримані числові значення було нормалізовано до відсоткової шкали (0–100%), що дозволяє більш показово порівнювати фреймворки між собою [14].

Таблиця 3. Порівняння Scrum, XP та DSDM за критеріями управління проєктами
Table 3. Comparison of Scrum, XP, and DSDM according to project management criteria

Критерій	Scrum	XP	DSDM
Управління вартістю (Cost Management)	75%	60%	65%
Управління часом (Time Management)	85%	60%	70%
Управління ризиками (Risk Management)	84%	78%	71%
Управління якістю (Quality Management)	83%	65%	75%
Управління людськими ресурсами (HR Management)	87%	70%	75%

Результати аналізу трьох найбільш поширених Agile-методологій — Scrum, XP та DSDM — демонструють помітну перевагу фреймворку Scrum у більшості ключових аспектів управління проєктами. Так, найвищі показники в управлінні часом і людськими ресурсами досягнуто саме в межах Scrum, що пояснюється високим рівнем організованості процесів, структурованою природою спринтів та регулярною командною взаємодією. Завдяки цьому забезпечується стабільне планування, швидка адаптація до змін і постійна координація всередині команди.

Методологія DSDM демонструє відносну збалансованість, зокрема у сфері управління якістю та людськими ресурсами, однак поступається Scrum за більшістю показників. Це пов’язано з тим, що DSDM більше орієнтований на формалізовані бізнес-процеси та має вищу вхідну складність, що потребує ретельнішої підготовки і чітко окреслених ролей ще до початку реалізації.

XP, хоча і відомий своєю гнучкістю та орієнтованістю на потреби клієнта, виявляє нижчі результати у більшості категорій, за винятком управління ризиками. Його перевага у цій сфері над методологією DSDM зумовлена короткими ітераціями, високим рівнем зворотного зв’язку і постійною участю замовника в процесі розробки. Однак, недостатній рівень структурованості у підходах до управління часом та вартістю може ускладнювати реалізацію великих або довгострокових проєктів.

Узагальнюючи результати порівняльного аналізу, можна стверджувати, що Scrum є найбільш адаптивним і збалансованим серед досліджуваних фреймворків. Його гнучка модель, чіткий розподіл відповідальностей та підтримка прозорої командної взаємодії створюють ефективну основу для впровадження до багаторівневої системи управління доступом. У контексті розробки системи управління завданнями з гнучкою ієрархією ролей, саме Scrum забезпечує найкращі передумови для ефективного планування, контролю і реалізації функціоналу відповідно до вимог безпеки, масштабованості та динаміки сучасних IT-проєктів.

5 Моделювання структури ролей для системи управління проєктними завданнями

Вибір моделі ролей, заснованої на фреймворку Scrum, є доцільним рішенням для системи управління завданнями завдяки численним перевагам, які ця структура забезпечує для команд, що працюють в умовах динамічного та гнучкого управління проектами. Як зазначено в розділі 4, в системах, де застосовуються Agile-методології, важливо мати чітко визначені ролі, щоб кожен учасник мав конкретну відповідальність і доступ до необхідних ресурсів для ефективної роботи. У Scrum структура ролей ретельно опрацьована та розподілена, що забезпечує оптимальну взаємодію між учасниками команди та дозволяє кожному з них працювати на своєму місці без перекриття обов'язків або порушення процесу (рис.1) [15].

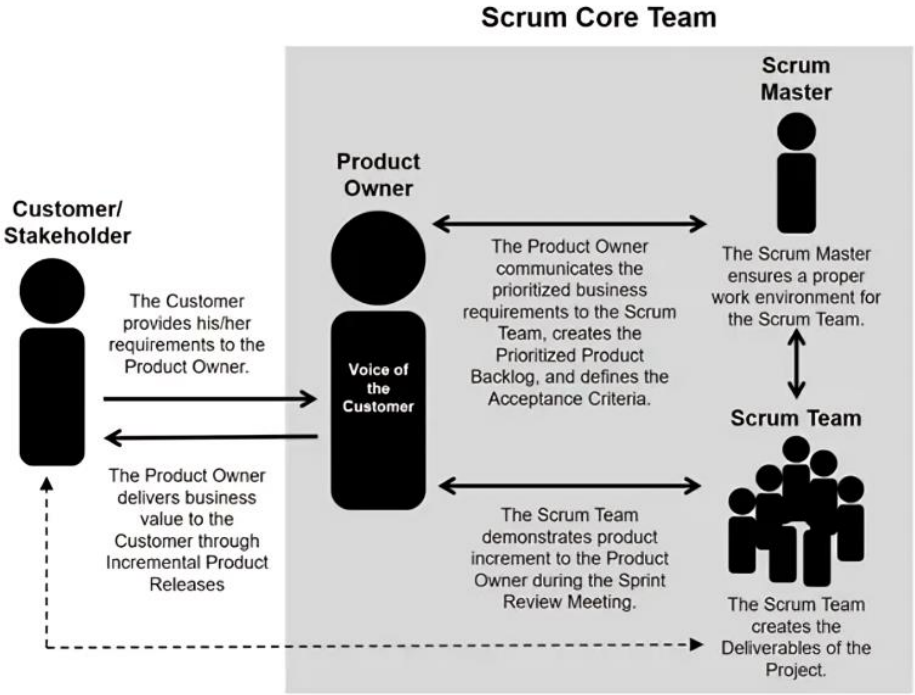


Рисунок 1. Структура ролей та зв'язків у Scrum
Figure 1. Structure of roles and relationships in Scrum

У системі управління завданнями важливо не тільки визначити чіткі ролі, але й встановити відповідні права доступу до кожного завдання, документа або процесу, щоб уникнути конфліктів. Ролі в Scrum чітко визначені та структуровані, що дозволяє спростити управління проектом. До того ж кожна роль має свій рівень доступу до завдань та їхнього виконання, що є основою для створення системи управління завданнями.

Таблиця 4. Оптимальна структура ролей для системи управління завданнями з багаторівневим доступом
Table 4. Optimal role structure for a task management system with multilevel access control

Роль	Опис ролі	Права доступу
Адміністратор (Admin)	Повний контроль над усіма модулями системи, включаючи управління користувачами та правами	Повний доступ до всіх завдань, функцій системи, включаючи створення, редагування, видалення, моніторинг
Власник продукту (Product Owner)	Визначає пріоритети, бачення продукту та вимоги до реалізації	Доступ до всіх завдань, редагування та встановлення пріоритетів, планування спринтів, але без адміністративних дій
Скрам-майстер (Scrum Master)	Координує команду та підтримує Scrum-процеси	Доступ до всіх завдань, редагування технічних та організаційних моментів, контроль процесу
Менеджер (Development Team)	Керує проектними ресурсами та координує роботу команд	Доступ до завдань своєї команди, перегляд, контроль виконання, часткове редагування в межах своєї зони відповідальності
Тімлід (Development Team)	Керує підрозділом розробки, відповідає за розподіл завдань та підтримку команди	Доступ до завдань команди, розподіл обов’язків, редагування технічних задач та контроль виконання
Старший розробник (Development Team)	Відповідає за складні технічні рішення, підтримує менш досвідчених колег	Доступ до технічних завдань, їх виконання та редагування, перегляд чужих завдань для надання зворотного зв’язку

Розробник середнього рівня (Development Team)	Має досвід для самостійного виконання задач середньої складності	Доступ до своїх завдань, виконання та часткове редагування, участь у командних завданнях
Молодший розробник (Development Team)	Виконує прості задачі під наглядом старших колег	Доступ лише до призначених завдань, право їх виконання, обмежене редагування
Фулстек розробник (Development Team)	Працює одночасно над фронтендом і бекендом системи	Повний доступ до задач, що охоплюють як клієнтську, так і серверну частини, їхнє редагування та виконання
Бекенд розробник (Development Team)	Займається серверною логікою та базами даних	Доступ до бекенд-завдань, право їх виконання та редагування
Фронтенд розробник (Development Team)	Працює над користувацьким інтерфейсом	Доступ до фронтенд-завдань, право їх виконання та редагування
Інженер з якості (Development Team)	Проводить автоматизоване та ручне тестування	Доступ до тестових завдань, створення тест-кейсів, перегляд інших завдань для перевірки
Тестувальник (Development Team)	Перевіряє функціональність реалізованих завдань	Доступ до завершених завдань для тестування, додавання коментарів та звітів про помилки

Структура ролей для системи управління завданнями з багаторівневим доступом (табл.4) базується на моделі Scrum, яка, як було обґрунтовано в попередньому розділі, є найбільш ефективною та адаптивною до сучасних вимог проєктного менеджменту. Її ключова перевага — це чіткий розподіл ролей і повноважень, що дозволяє створити команду, здатну ефективно реагувати на зміни та забезпечувати стабільну реалізацію проєкту. Основні ролі Scrum — це *власник продукту (Product Owner)*, *скрам-майстер (Scrum Master)* і *команда розробників (Development Team)*, і саме на них базується фундамент запропонованої структури. Проте, у процесі практичного застосування цієї моделі, виникає необхідність розширити її за рахунок додаткових ролей, які хоч і не входять до оригінального складу Scrum, проте суттєво підсилюють функціональність системи.

Насамперед варто звернути увагу на роль *адміністратора*, яка не передбачена Scrum, однак є критично важливою для системи управління завданнями з точки зору технічного адміністрування, контролю безпеки, управління користувачами, доступом і загальними системними параметрами. Її присутність дозволяє відокремити рівень технічного супроводу від проєктної роботи, що підвищує стабільність системи.

Додаткова роль *менеджера* також не є частиною класичної Scrum-моделі, однак її включення до системи дає змогу реалізувати ефективну взаємодію між кількома командами, що часто необхідно в корпоративному середовищі. Менеджер може не брати участі у щоденних Scrum-активностях, однак його функціонал важливий для зовнішнього управління ресурсами, планування бюджету або інтеграції із бізнес-процесами компанії.

Деталізація розробницької команди через введення ролей *тімліда, старшого, середнього, молодшого розробника*, а також спеціалізацій (*фулстек, фронтенд, бекенд*) дозволяє значно точніше контролювати доступ до завдань залежно від рівня кваліфікації та сфери компетенції. Така деталізація не лише відповідає реальним практикам IT-команд, але й дозволяє гнучко розподіляти обов’язки, уникати дублювання функцій і забезпечувати ефективне наставництво, що є важливим для сталого розвитку команди.

Так само важливими є ролі *інженера з якості* та *тестувальника*, які в класичному Scrum розглядаються як частина кросфункціональної команди. Проте, в реальних умовах проєктів, особливо з високими вимогами до безпеки, виокремлення цих ролей дозволяє побудувати

незалежний процес контролю якості, що знижує ризики дефектів, дозволяє проводити спеціалізовані аудити і забезпечує вищу якість кінцевого продукту.

Таким чином, поєднання базової Scrum-структури з розширеним переліком ролей дозволяє створити систему управління завданнями, яка поєднує переваги формального управління, саморганізованих команд і ролей, адаптованих до реалій сучасного розробницького середовища. Це підвищує як технічну ефективність, так і управлінську контрольованість проєктів різного рівня складності.

6 Висновки

У даній статі проведено порівняльний аналіз різних моделей ролей для систем управління проєктними завданнями, зокрема на основі фреймворків Agile, таких як Scrum, XP та DSDM. Було детально розглянуто структуру ролей у цих методологіях та їхню ефективність у контексті управління завданнями. Результати дослідження показали, що модель ролей Scrum є найбільш підхожою для інтеграції в систему управління завданнями завдяки чітко визначеним ролям, що дозволяє забезпечити ефективну взаємодію між учасниками команди та забезпечити контроль над виконанням завдань.

Зокрема, Scrum забезпечує високу гнучкість і адаптивність завдяки чітко розподіленим ролям: власнику продукту, скрам-майстру та команді розробників. Така структура дозволяє створити самоуправлінську команду, яка здатна оперативно реагувати на зміни та досягати високої продуктивності. У порівнянні з іншими фреймворками, такими як XP і DSDM, Scrum надає більш структурований підхід до управління завданнями та дозволяє ефективно керувати процесом завдяки регулярним зустрічам та ретроспективам.

Крім того, впровадження додаткових ролей, таких як адміністратор та менеджер, а також спеціалізацій серед розробників, значно підвищує функціональність та масштабованість системи. Це дозволяє створити багаторівневу структуру управління з чітким контролем доступу та забезпечити належний рівень безпеки та ефективності в процесі реалізації проєкту.

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність використання Scrum як основи для побудови системи управління завданнями з багаторівневим доступом. Вибір цієї моделі ролей дозволяє оптимізувати управління проєктами, покращити ефективність командної роботи та забезпечити високу якість виконання завдань у складних і масштабних проєктах.

REFERENCES

1. D. Jefferies, “From deadlines to budgets, project management skills have become vital for everyone – here’s how to make it all easier,” The Guardian. [Online]. Available: https://www.theguardian.com/it-starts-with-smartsheet/2025/jan/31/from-deadlines-to-budgets-project-management-skills-have-become-vital-for-everyone-heres-how-to-make-it-all-easier
2. P. GmbH, “7 central advantages of project management software,” Projektron GmbH, Berlin, 2001-2025, Jan. 27, 2023. [Online]. Available: https://www.projektron.de/en/blog/details/advantages-project-management-software-3728/
3. L. Lockhart, “How to structure and manage a first-rate project team,” Float - Resource Management, Planning & Scheduling Software, Aug. 09, 2024. https://www.float.com/resources/structure-and-manage-project-team
4. Toxigon, “Why role definition matters in team strategies,” Toxigon, Dec. 13, 2024. https://toxigon.com/the-importance-of-role-definition-in-team-strategies
5. M. Levinson, M. Levinson, and M. Levinson, “Defining roles, responsibilities and skills in project staffing plan,” Your Guide to Project Management Best Practices, Jun. 26, 2023. https://mymanagementguide.com/defining-roles-responsibilities-skills-project-staffing-plan/
6. M. Chervenkova, “Agile Team Roles and responsibilities: A complete guide,” Kanban Software for Agile Project Management, Jul. 07, 2022. https://businessmap.io/blog/agile-team-roles
7. Scrum.org, “What is Scrum?,” Scrum.org. https://www.scrum.org/learning-series/what-is-scrum/
8. K. McDonald, “What is Extreme Programming (XP)? | Agile Alliance,” Agile Alliance |, Oct. 18, 2023. https://www.agilealliance.org/glossary/xp
9. The Agile Handbook, “Dynamic Systems Development Method (DSDM): driving Agile project success,” May 06, 2023. https://theagilehandbook.com/blog/dynamic-systems-development-method/

10. Agile Business, "Chapter 7: Roles and Responsibilities." https://www.agilebusiness.org/dsdm-project-framework/roles-and-responsibilities.html
11. J. Flynn, "16 Amazing Agile Statistics [2023]: What companies use agile methodology," Zippia, Jun. 28, 2023. https://www.zippia.com/advice/agile-statistics/
12. S. Gadani, U. Mankad, and M. Gahlawat, "Comparative Analysis of Agile Software Development Methodologies: A literature review," Lecture Notes in Networks and Systems, p. 246, Jan. 2025, doi: 10.1007/978-981-97-9529-1_21.
13. S. Gadani, U. Mankad, and M. Gahlawat, "Comparative Analysis of Agile Software Development Methodologies: A literature review," Lecture Notes in Networks and Systems, pp. 245–246, Jan. 2025, doi: 10.1007/978-981-97-9529-1_21.
14. I. Ahmed et al., "The Influence of Kanban Agile Methodology on Software Project Management: A Survey method," 2021 International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET), pp. 1–6, Dec. 2024, doi: 10.1109/iceet65156.2024.10913653.
15. SCRUMstudy, "Understanding defined roles and responsibilities in a Scrum ...," Oct. 21, 2022. https://www.scrumstudy.com/article/understanding-defined-roles-and-responsibilities-in-a-scrum-project

Lysytskyi Kostiantyn *PhD on Technical Sciences, Associate Professor;*
Associate Professor of Mathematical Modeling and Data Analysis;
V.N. Karazin Kharkiv National University 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine
e-mail: constantin.lisickiy@karazin.ua;
https://orcid.org/0000-0002-7772-3376

Soldatenko Denys *student;*
V.N. Karazin Kharkiv National University Svobody Sq 4, Kharkiv, Ukraine, 61022
e-mail: soldatenko2020ks13@student.karazin.ua;
https://orcid.org/0009-0001-0486-0265

Modeling the structure of roles in a project task management system

Relevance. In modern project management information systems, a clear role structure is critical for the effective organization of teamwork. The Scrum, XP, and DSDM methodologies involve the distribution of authority and access to resources according to the functional roles of participants. This is especially relevant in large-scale projects with a multi-level access structure, where proper role modeling helps to increase productivity, security, and controllability of development processes. Insufficient formalization of roles can lead to duplication of functions, conflicts in teams, and a decrease in overall management efficiency. Therefore, the development of a flexible and adaptive model of role distribution is an important step in creating modern systems for planning and controlling tasks.

Objective. The purpose of the article is to model the structure of roles in the project task management system, taking into account the main project management methodologies, such as Scrum, XP, DSDM. The article analyzes the key roles and responsibilities within each of these methodologies, as well as compares these models in terms of their suitability for a task planning system. In addition, the article aims to investigate which of the models is the most optimal for organizing tasks in systems with multi-level access.

Research methods. Comparative analysis, modeling.

Results. A comparative analysis of three project management methodologies - Scrum, XP, and DSDM - was conducted to determine their effectiveness in the context of building a task management system. Based on the role structure proposed in Scrum, a multi-level model of team role distribution was developed, which takes into account the skill level of each participant. The proposed model was improved by introducing additional roles, which allowed the system to better adapt to the real working conditions of modern IT teams. For each role, areas of responsibility and levels of access to the system's functionality were defined, which allows for flexible process management, enhanced security, and convenient scalability. Particular attention is paid to detailing the roles of developers depending on their professional level (junior, middle, senior), which positively affects the effectiveness of team interaction, quality control of tasks performed, and the process of mentoring in the team.

Conclusions. A model of the structure of roles in the Scrum-based project task management system has been developed, taking into account extensions that meet the realities of the modern IT industry. The influence of each role on the functioning of the management system is determined and it is found that it is the combination of basic Scrum roles with additional specialized roles that allows to form a stable multi-level system that can adapt to changes in the project environment.

Keywords: *role, role structure, task management system, Agile methodologies, access rights.*

Надійшла у першій редакції 17.02.2025, в останній - 21.03.2025.
The first version has been received on 17.02.2025, the final version - on 21.03.2025.

DOI: https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-05

УДК (UDC) 004.428:004.9:654

Лупандін Антоній Володимирович
магістр комп'ютерних наук
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна
e-mail: anlupandin@icloud.com;
https://orcid.org/0009-0002-7591-5152

Хруслов Максим Михайлович
кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри комп'ютерних систем та робототехніки, старший дослідник, доцент
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна
e-mail: maksym.khruslov@karazin.ua;
https://orcid.org/0000-0001-9639-9340

Копєйкін Володимир Васильович
старший викладач кафедри комп'ютерних систем та робототехніки
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, Харків, 61022, Україна
e-mail: volodymyr.kopieikin@karazin.ua; vertexyz@gmail.com;
https://orcid.org/0009-0009-6845-7211

Проєктування та перспективи створення модульної GSM-бібліотеки для MicroPython з підтримкою NB-IoT

Актуальність. У контексті зростаючої популярності Інтернету речей (IoT) все більшої актуальності набуває створення програмного забезпечення, сумісного з обмеженими апаратними ресурсами. Технологія NB-IoT забезпечує енергоефективний зв'язок для автономних пристроїв, однак її інтеграція у середовищі MicroPython залишається недостатньо опрацьованою через обмеження наявних GSM-бібліотек. Проблематика ефективної взаємодії мікроконтролерів з GSM-модулями потребує розробки адаптованих інструментів.
Мета. Метою роботи є аналіз сучасних бібліотек для взаємодії з GSM-модулями з акцентом на NB-IoT-проєкти та формулювання вимог до нової бібліотеки, оптимізованої для середовища MicroPython.
Методи дослідження. Застосовано порівняльний аналіз функціональних можливостей, архітектури та сумісності п'яти поширених бібліотек: pySerial, GSMComm, Adafruit FONA, TinyGSM, GSM (Arduino). Дослідження здійснювалося за критеріями підтримки AT-команд, енергоефективності, розширюваності, обробки помилок та придатності до MicroPython.
Результати. Встановлено, що жодна з досліджених бібліотек не забезпечує повної підтримки MicroPython-середовища без обмежень. Основні недоліки полягають у відсутності модульності, низькому рівні адаптації до NB-IoT та обмеженій обробці помилок. На основі аналізу сформульовано концепцію нової бібліотеки з модульною архітектурою, адаптованою до MicroPython, з окремими модулями для AT-команд, роботи з мережею, обробки помилок та інтеграції з IoT-протоколами (MQTT, HTTP). Запропоновано структурну модель бібліотеки та UML-діаграми її компонентів.
Висновки. Проведене дослідження підтверджує потребу у створенні нової спеціалізованої GSM-бібліотеки, що поєднувала б гнучкість, енергоефективність і простоту інтеграції з MicroPython для застосування в NB-IoT-пристроях. Запропоновані архітектурні рішення орієнтовані на зниження навантаження на апаратну частину, забезпечення стабільної комунікації та спрощення розробки IoT-проєктів.

***Ключові слова**: GSM, NB-IoT, MicroPython, AT-команди, модульна архітектура, IoT, енергоефективність, pySerial, GSMComm, Adafruit FONA, TinyGSM, Arduino.*

Як цитувати: Лупандін А. В. Хруслов М. М., Копєйкін В. В. Перспективи створення спеціалізованої gsm-бібліотеки для micropython у проєктах NB-IoT. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2025. вип. 65. С.57-66. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-05

How to quote: A. Lupandin, M. Khruslov, V. Kopieikin, "Design and Prospects for Developing a Modular GSM Library for MicroPython with NB-IoT Support ", *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv*

© Лупандін А.В., Хруслов М.М., Копєйкін В.В., 2025
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems, vol. 65, pp. 57-66, 2025. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-05 [in Ukrainian]

Вступ

У сучасних умовах розробки пристроїв Інтернету речей (IoT) на передній план виходить використання енергоефективних та надійних технологій зв'язку. Однією з таких технологій є NB-IoT (Narrowband IoT), що забезпечує довгострокове з'єднання з низьким енергоспоживанням, що є особливо важливим для автономних пристроїв з обмеженими ресурсами.

Модулі GSM з підтримкою NB-IoT вже набули широкого застосування, однак їх використання з обмеженими ресурсами мікроконтролерів у середовищі MicroPython досі недостатньо опрацьоване. У цій роботі проведено аналіз існуючих інструментів (бібліотек), виявлено їхні недоліки та визначено напрями створення спеціалізованого інструментарію для NB-IoT-комунікації в середовищі MicroPython.

1. Огляд бібліотек

1.1. Бібліотека pySerial

pySerial — це широко поширена бібліотека Python, яка забезпечує послідовний зв’язок між різними платформами, включаючи Windows, Linux і macOS. Незважаючи на те, що pySerial не є специфічним для GSM, він служить базовим рівнем для багатьох бібліотек GSM та IoT, керуючи низькорівневими послідовними взаємодіями, необхідними для надсилання та отримання AT-команд модулям GSM.

Розроблена Крісом Ліхті, pySerial активно розробляється з 2001 року. Вона підтримується за ліцензією з відкритим вихідним кодом, заохочуючи внески спільноти та широке використання як в академічних, так і в комерційних проектах.

Ця бібліотека сумісна з різними платформами, що забезпечує широке використання. Конфігурація послідовного порту дозволяє детально налаштувати такі параметри, як швидкість передачі даних, парність, стоп-біти та параметри тайм-ауту. Підтримує як блокуючі, так і неблокуючі операції читання/запису. Легко інтегрується з іншими бібліотеками та фреймворками Python, слугуючи серверною частиною для комунікаційних модулів вищого рівня.

pySerial побудовано навколо класу Serial, який інкапсулює всі функції, пов’язані з послідовним зв’язком. Ключові компоненти включають Serial Class, який керує життєвим циклом послідовного порту. Підтримка потоків дозволяє одночасно виконувати операції читання та запису, що може бути корисно для складніших сценаріїв взаємодії. Бібліотека діє як міст зв'язку для надсилання AT-команд і отримання відповідей від модулів GSM.

Серед переваг цієї бібліотеки сумісність із широким спектром послідовних пристроїв, простий API, що скорочує час навчання для розробників, широке тестування, велика база користувачів та документація. Недоліки включають відсутність специфічної підтримки GSM, необхідність додаткової розробки специфічних GSM-функцій.[1]

1.2. Бібліотека GSMComm

GSMComm — це бібліотека .NET, ретельно створена для GSM-зв’язку, яка пропонує повний набір функцій для надсилання SMS, здійснення дзвінків, керування з’єднаннями для передачі даних і керування конфігураціями мережі. Створений для розробників, що працюють в екосистемі .NET, GSMComm оптимізує взаємодію з модулями GSM шляхом абстрагування низькорівневої обробки команд AT.

GSMComm розроблена спільнотою і підтримується на таких платформах, як GitHub, завдяки чому стала популярною серед розробників завдяки надійному функціоналу і простоті інтеграції з програмами на платформі .NET.

Бібліотека полегшує надсилання та отримання SMS-повідомлень. Дозволяє ініціювати та завершувати голосові виклики через модулі GSM. Підтримує встановлення з’єднань для передачі даних і керування ними, включаючи налаштування конфігурацій APN. Надає інструменти для моніторингу потужності сигналу та стану мережі. Використовує події для сповіщення додатків про вхідні повідомлення, стан викликів та інші дії модуля GSM. Реалізує комплексні механізми виявлення помилок і звітування для забезпечення надійної роботи. GSMComm побудовано

навколо об'єктно-орієнтованого дизайну, розділяючи різні функції GSM на окремі класи для кращої організації та зручності обслуговування.

Клас GsmCommMain діє як основний інтерфейс для ініціалізації зв'язку, надсилання команд і керування операціями GSM.

Клас SMS інкапсулює функції, пов'язані з SMS, зокрема надсилання та отримання повідомлень. Клас Call керує операціями голосового виклику, дозволяючи розробникам ініціювати та завершувати виклики програмно. Клас Network виконує завдання, пов'язані з мережею, наприклад конфігурацію APN і моніторинг потужності сигналу. Events надає обробники подій для реагування на асинхронну діяльність модуля GSM, покращуючи швидкість реагування програм [2].

Ця бібліотека ідеальна для додатків, які потребують масового надсилання SMS-повідомлень і автоматизованої обробки SMS-повідомлень. Підходить для систем, яким потрібно автоматизувати операції голосових дзвінків, наприклад для автоматизованих операторів або систем відстеження дзвінків. GSMComm дозволяє додаткам керувати з'єднаннями для даних для модулів GSM із підтримкою Інтернету, що полегшує розгортання IoT. Також надає допомогу в розробці інструментів для моніторингу якості мережі та стану модуля GSM у режимі реального часу.

Щодо переваг, бібліотека GSMComm пропонує широкий спектр операцій GSM із коробки, зменшуючи потребу в додаткових впровадженнях. Об'єктно-орієнтований дизайн сприяє розширюваності та зручності обслуговування завдяки структурованій ієрархії класів. Використовує надійність і функції .NET Framework, отримуючи переваги від його інструментів і бібліотек. Абстракції високого рівня зменшують складність взаємодії GSM для розробників, підвищуючи продуктивність, завдяки зручному API.

Серед недоліків бібліотеки можна зазначити її обмеженість середовищем .NET, що унеможливлює використання в інших мовах програмування або платформах, наприклад, MicroPython. Крім того, GSMComm може бути надмірно складною для простих додатків.»

«Порівняно з поширенішими бібліотеками, такими як pySerial, GSMComm має меншу спільноту, що обмежує доступність підтримки та додаткових ресурсів. Також важливо враховувати, що бібліотека потребує середовища виконання .NET, що часто є неприйнятним для пристроїв з обмеженими ресурсами, таких як мікроконтролери.

1.3. Бібліотека Adafruit FONA

Adafruit FONA Library — це спеціалізована бібліотека, розроблена для серії GSM-модулів Adafruit FONA. Реалізований в Arduino, він забезпечує високорівневі абстракції для загальних функцій GSM, спрощуючи взаємодію з апаратним забезпеченням FONA та дозволяючи швидку розробку проектів з підтримкою GSM.

Розроблена компанією Adafruit Industries, відомим постачальником обладнання та програмного забезпечення з відкритим кодом, бібліотека FONA ретельно задокументована та підтримується численними прикладами та посібниками. Він оптимізований для власних модулів GSM Adafruit, але може бути адаптований для використання з сумісним обладнанням.

Adafruit FONA Library дозволяє легко надсилати та отримувати SMS-повідомлення

Adafruit FONA Library полегшує ініціювання та завершення голосових викликів програмним шляхом. Підтримує встановлення з'єднань даних GPRS для доступу до Інтернету. Надає методи для налаштування параметрів APN і керування параметрами мережі. Містить функції для моніторингу стану батареї та керування живленням модуля GSM. Керує сигналами готовності терміналу даних (DTR) для керування модулем. Забезпечує керування параметрами аудіо, увімкнення та вимкнення функцій мікрофона та динаміка. Вбудовані функції забезпечують функції високого рівня, які абстрагують базові AT-команди, зменшуючи потребу в реалізації команд вручну.

Бібліотека Adafruit FONA побудована на основі Arduino, використовуючи класи та методи для інкапсуляції функцій GSM. Клас Adafruit_FONA – центральний клас, який надає методи для SMS, викликів і мережевих операцій. Похідні класи від цього є спеціалізовані класи, які розширюють базову функціональність для підтримки різних версій модуля FONA. Службові функції включає допоміжні функції для аналізу відповідей, керування підключеннями та обробки помилок. Каталог прикладів містить численні приклади ескізів, що демонструють різні випадки використання, допомагаючи розробникам зрозуміти та ефективно використовувати бібліотеку [3].

Бібліотека ідеально підходить для любителів і освітніх проектів, які потребують можливостей GSM, таких як SMS-сповіщення, віддалені виклики та реєстрація даних. Підходить для створення пристроїв Інтернету речей, яким потрібно спілкуватися через мережі GSM, що забезпечує підключення до Інтернету у віддалених місцях. Сприяє розробці носимих технологій, які використовують GSM для зв'язку та передачі даних. Дозволяє створювати системи віддаленого моніторингу та керування, які покладаються на GSM для передачі даних і отримання команд.

Перевагою може бути те, що Adafruit FONA Library розроблена спеціально для модулів FONA від Adafruit, що забезпечує оптимізовану продуктивність і сумісність, але це має зворотню сторону, про котру буде написано нижче. API високого рівня абстрагує складність взаємодії GSM, дозволяючи розробникам зосередитися на логіці програми, а не на обробці команд низького рівня. Бібліотека пропонує розширену документацію, включаючи докладні посилання на функції, приклади використання та навчальні посібники, що полегшує впровадження. Активні форуми спільноти та канали підтримки покращують досвід розробників, надаючи допомогу та сприяючи спільному розвитку. Плавно інтегрується з середовищем розробки Arduino, використовуючи переваги інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу та розгалуженої екосистеми.

Серед недоліків варто зазначити, що бібліотека розроблена виключно для модулів FONA від Adafruit, що зменшує її корисність при роботі з іншим обладнанням GSM і потребує додаткових змін для сумісності. Залежність від Arduino Framework може бути перешкодою для розробників, які використовують інші екосистеми або мови програмування.

Крім того, бібліотека не підтримує інші платформи, зокрема MicroPython, що обмежує її застосування у різноманітних проєктах. Незважаючи на достатність функцій для базових операцій GSM, вона не підтримує розширені функції, такі як інтеграція з MQTT або комплексну обробку помилок, необхідні для складних проєктів IoT.

1.4. Бібліотека TinyGSM

TinyGSM — це легка бібліотека GSM, створена для плат Arduino та ESP8266/ESP32. Вона підтримує широкий спектр модулів GSM і надає такі функції, як SMS, HTTP і MQTT зв'язок, що робить її дуже універсальною для різних додатків IoT. TinyGSM розроблено для ефективної роботи, мінімізуючи накладні витрати на пам'ять і обробку даних, що має вирішальне значення для мікроконтролерів з обмеженими ресурсами.

TinyGSM, розроблена Володимиром Шиманським, стала популярною в спільнотах Arduino та ESP8266/ESP32 завдяки легкій архітектурі та широкій сумісності з GSM-модулями. Вона підтримується на GitHub із активним внеском спільноти, що покращує набір функцій і сумісність.

Бібліотека полегшує надсилання та отримання SMS-повідомлень із підтримкою об'єднаних повідомлень. Вона дозволяє ініціювати та завершувати голосові виклики програмно. Підтримує встановлення з'єднань GPRS для доступу до Інтернету та передачі даних. Дозволяє надсилати HTTP-запити GET і POST, полегшуючи інтеграцію веб-служб. Забезпечує функції клієнта MQTT для публікації та підписки на обмін повідомленнями, необхідних для програм IoT. Містить методи налаштування конфігурації APN і керування параметрами мережі. Пропонує інструменти для моніторингу потужності сигналу та стану мережі. Оптимізовані енерговитрати, підходить для пристроїв IoT з живленням від батареї. Сумісна із широким спектром модулів GSM, включаючи SIM800, SIM900, A6, M95 тощо.

TinyGSM використовує модульну та розширювану архітектуру, розділяючи функціональні можливості на окремі класи та модулі для сприяння зручності обслуговування та масштабованості. Основний клас TinyGsm надає доступ до функцій GSM, слугуючи основним інтерфейсом для розробників. Також є спеціалізовані класи, які обробляють особливості зв'язку для різних модулів GSM, забезпечуючи сумісність і оптимізовану продуктивність. Існують виділені класи, які керують зв'язками HTTP і MQTT, абстрагуючись від базових деталей протоколу.

Бібліотека включає допоміжні функції для аналізу відповідей, керування підключеннями та обробки помилок.

Дозволяє розробникам налаштовувати такі параметри, як швидкість передачі даних, тайм-аути та параметри живлення відповідно до конкретних установок апаратного забезпечення.[4]

Добре підходить для створення пристроїв IoT, які потребують підключення до Інтернету для передачі даних, віддаленого моніторингу та контролю. Віддалене ведення журналу даних дозволяє створювати системи віддаленого журналювання, які надсилають дані датчиків до

хмарних служб через HTTP або MQTT. Спрощує надсилання SMS-сповіщень і сповіщень для систем моніторингу та оповіщення. Підтримуються програми, які вимагають функцій голосового виклику, наприклад віддалена допомога або автоматична обробка викликів. Інтегрує модулі GSM у налаштування розумного будинку для дистанційного керування та обміну даними.

Серед переваг це легкий дизайн оптимізований для мікроконтролерів з обмеженими ресурсами, що забезпечує ефективну продуктивність і низьке використання пам'яті. Модульна архітектура полегшує включення лише необхідних компонентів, підвищуючи гнучкість і оптимізуючи ресурси. Також бібліотека сумісна із широким спектром модулів GSM, що збільшує його застосовність у різноманітних проектах і налаштуваннях обладнання. Надає API високого рівня, через що має зручні методи роботи GSM, зменшуючи складність впровадження. Отримує переваги від постійних внесків і підтримки з боку активної спільноти, що забезпечує постійні вдосконалення та оновлення. Пропонує велику документацію та численні приклади, допомагаючи розробникам зрозуміти та ефективно використовувати бібліотеку.

Відносно недоліків варто зазначити, що деякі розширені функції або підтримка окремих модулів можуть мати недостатню документацію, що ускладнює впровадження у складних проєктах. Також абстрагування низькорівневих функцій обмежує детальний контроль, що може бути критичним для спеціалізованих застосувань.

Крім того, керування залежностями та конфігураціями для різних GSM-модулів може бути досить складним, особливо в проєктах з кількома типами обладнання. Бібліотека TinyGSM орієнтована переважно на платформи Arduino та ESP8266/ESP32 і має обмежену сумісність із середовищем MicroPython, що значно зменшує її придатність для відповідних проєктів.

1.5. Бібліотека GSM

Бібліотека GSM — це вбудована бібліотека в екосистемі Arduino, що забезпечує основні функції GSM. Вона підходить для звичайних програм, які вимагають простих операцій GSM, таких як надсилання SMS або здійснення дзвінків. Хоча вона не така багата функціями, як спеціалізовані бібліотеки, такі як TinyGSM або Adafruit FONA Library, вона пропонує простий інтерфейс для базової взаємодії GSM.

Бібліотека GSM, що входить до складу Arduino IDE, підтримується спільнотою Arduino. Вона розроблена для бездоганної роботи з Arduino GSM Shield та іншими сумісними GSM-модулями, забезпечуючи легкість інтеграції та розгортання для базових проектів GSM.

Бібліотека дозволяє надсилати та отримувати SMS-повідомлення з базовими функціями. Облегшує ініціювання та завершення голосових викликів програмним шляхом. Підтримує встановлення з'єднань GPRS для доступу до Інтернету, хоча й з обмеженими можливостями порівняно з більш просунутими бібліотеками. Надає методи налаштування конфігурацій APN і керування параметрами мережі. Містить основні інструменти для моніторингу потужності сигналу та стану мережі. Дозволяє запитувати інформацію про SIM-картку та керувати нею, наприклад перевіряти стан SIM-картки та отримувати номери телефонів. GSM розроблена для роботи з Arduino GSM Shields без коробки, що спрощує процес налаштування для початківців.

Бібліотека GSM використовує процедурну та зрозумілу архітектуру, що відповідає простоті моделі програмування Arduino. Центральний клас – клас GSM, надає методи для операцій GSM, слугуючи основним інтерфейсом для розробників. Бібліотеку оптимізовано для Arduino GSM Shield, що забезпечує безперебійний зв'язок і апаратну сумісність. Містяться допоміжні функції для аналізу відповідей і керування з'єднаннями, хоча й з обмеженою глибиною порівняно з більш спеціалізованими бібліотеками [5].

Ідеально підходить для проектів, які потребують надсилання та отримання SMS-повідомлень, таких як системи сповіщень або боти для обміну повідомленнями. Підходить для додатків, які потребують автоматизації голосових викликів, наприклад для автоматизованих операторів або систем відстеження викликів. Забезпечує базове підключення до Інтернету для пристроїв IoT, полегшуючи передачу даних і віддалений моніторинг. Служить чудовим навчальним засобом для початківців, які вивчають зв'язок GSM у середовищі Arduino.

Перевагами є простий API який узгоджується з моделлю програмування Arduino, що робить його доступним для початківців і простих проектів. Швидке розгортання сприяє швидкому створенню прототипів і розгортанню основних функцій GSM без тривалого налаштування. Бібліотека плавно інтегрується з середовищем розробки Arduino, використовуючи переваги його

інтуїтивно зрозумілого інтерфейсу та розгалуженої екосистеми. Розроблено спеціально для Arduino GSM Shields, що забезпечує оптимізовану продуктивність і сумісність.

До недоліків бібліотеки належать обмежений набір функцій, які охоплюють лише базові можливості GSM, без підтримки більш розширених операцій, таких як HTTP чи MQTT. Бібліотека також не підходить для масштабованих або складних IoT-проєктів, що вимагають розширених можливостей.

Крім того, GSM-бібліотека є апаратно-залежною, оптимізованою для роботи з Arduino GSM Shield, що знижує гнучкість її використання з іншим обладнанням. Відсутність повноцінних механізмів обробки помилок і обмежена документація можуть спричинити труднощі в реалізації складніших завдань.

2. Порівняння архітектури бібліотек

Розуміння структурного дизайну бібліотек GSM має вирішальне значення, оскільки це безпосередньо впливає на їх зручність використання, розширюваність і продуктивність. У цьому підрозділі розглядаються архітектурні компоненти розглянутих бібліотек, підкреслюючи подібності та відмінності.

Більшість бібліотек GSM мають основну структуру, що складається з таких компонентів:

- Командний інтерфейс керує надсиланням і отриманням AT-команд через послідовні канали зв’язку. Зазвичай інкапсульована в клас, який обробляє послідовні операції низького рівня.

- Парсер команд інтерпретує відповіді від модуля GSM, перетворюючи їх у дані, які можна виконати, або створюючи відповідні винятки. Реалізовано як частину командного інтерфейсу або як окремий модуль для обробки конкретних командних відповідей.

- Менеджер підключень обслуговує такі пов’язані з мережею функції, як підключення до стільникової мережі, керування налаштуваннями APN і моніторинг якості сигналу. Часто розробляється як окремий клас або інтегрується в основні функції бібліотеки.

- Інтеграції полегшує інтеграцію з сервісами вищого рівня, такими як брокери MQTT, HTTP-сервери або хмарні платформи (наприклад, Blynk). Реалізовано як додаткові модулі або класи, які розширюють основні функції.

- Моделі визначає структури даних, що представляють різні сутності та команди в контексті зв’язку GSM. Часто прості класи даних або структури, які інкапсулюють параметри команд і відповіді.

- Утиліти надають допоміжні функції для таких завдань, як перетворення даних, керування станом і журналювання. Реалізовано як окремі модулі для сприяння повторному використанню коду та модульності.

- Обробка помилок реалізує спеціальні винятки для ефективного керування та реагування на помилки зв’язку. Визначається як спеціальні класи винятків, які створюються на основі конкретних умов помилки.

Для кращого сприйняття у таблиці 1 представлено порівняльний аналіз основних структурних блоків бібліотек. Приведено перелік бібліотек й основних компонентів. Кожна існуюча бібліотека має власний набір переваг і обмежень, що впливає на їх придатність для різних програм.

Попередньо підсумовуючи можна зазначити, що pySerial служить низькорівневою бібліотекою послідовного зв’язку без специфічних для GSM абстракцій. GSMComm і TinyGSM пропонують комплексні структури з усіма основними компонентами, що робить їх придатними для складних програм.[6]

Бібліотека Adafruit FONA забезпечує спеціалізовану структуру, оптимізовану для конкретного обладнання, з частковими реалізаціями деяких компонентів. GSM (бібліотека Arduino) пропонує спрощену структуру, орієнтовану на основні функції GSM, придатну для простих проектів.

Таблиця 1. Порівняльний аналіз структурних блоків бібліотек
Table 1. Comparative analysis of library structural blocks

Бібліотека	Інтерфейс команд	Парсер команд	Менеджер з'єднань	Інтеграції	Моделі	Утиліти	Обробка помилок
pySerial	Так	Ні	Ні	Ні	Ні	Мінімальний	Ні
GSMComm	Так	Так	Так	Так	Так	Мінімальний	Так
Adafruit FONA Library	Так	Частково	Частково	Ні	Так	Так	Так
TinyGSM	Так	Так	Так	Так	Так	Так	Так
GSM (Arduino Library)	Так	Частково	Частково	Ні	Ні	Мінімальний	Мінімальний

3. Концепція та структура проєктування спеціалізованої бібліотеки для MicroPython

У цьому розділі буде представлено концепцію майбутньої розробки бібліотеки послідовних команд, оптимізованої для застосування в середовищах MicroPython. Виходячи з результатів попереднього аналізу наявних рішень і виявлених функціональних обмежень, буде сформульовано основні підходи до проектування, архітектурні принципи, методи реалізації, а також запропоновано сценарії тестування, які дозволять ефективно реалізувати поставлені цілі.

У межах запропонованого підходу бібліотека спиратиметься на принципи об’єктно-орієнтованого програмування: кожен функціональний блок (робота з AT-командами, обробка помилок, підключення до мережі) буде інкапсульовано у відповідні класи, реалізуючи спадкування та поліморфізм. Це забезпечить уніфікований інтерфейс взаємодії з різними GSM-модулями та спростить підтримку коду.

Модульна архітектура бібліотеки дозволить (рис.1):

– повторно використовувати компоненти в різних проєктах;
– ізолювати зміни, що спростить обслуговування та оновлення;
– безболісно додавати підтримку нових модулів;
– тестувати окремі частини системи незалежно.

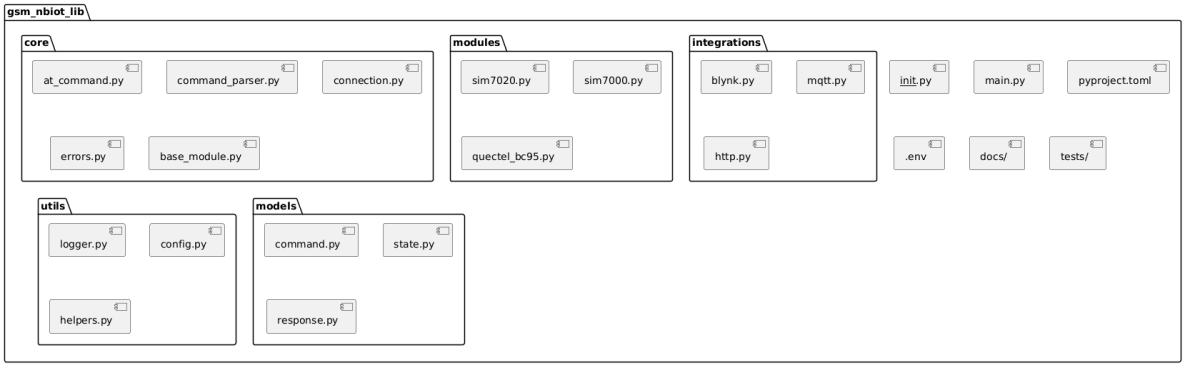


Рис. 1 UML-діаграма пакетів
Fig. 1 UML package diagram

Структура коду передбачає розділення на логічні каталоги (рис. 2): ядро, реалізації модулів, утиліти, тести та приклади. Це забезпечить зрозумілу організацію проєкту, спростить навігацію та командну розробку.

З архітектурної точки зору, проєкт передбачатиме чітке розділення базової логіки обробки AT-команд і управління мережею від реалізацій, специфічних для окремих GSM-модулів. Це забезпечить стабільність, гнучкість і тривалий життєвий цикл рішення.

Бібліотека матиме модульну архітектуру, що забезпечуватиме масштабованість, повторне використання коду та зручну інтеграцію з різними GSM/NB-IoT модулями.

```
gsm_nbiot_lib/
├── gsm_nbiot_lib/
│   ├── __init__.py                 # Ініціалізація пакету
│   ├── core/
│   │   ├── __init__.py             # Ініціалізація модуля ядра
│   │   ├── at_command.py           # Низькорівнева робота з AT-командами
│   │   ├── command_parser.py       # Парсер відповідей AT-команд
│   │   ├── connection.py           # Управління підключенням та станом мережі
│   │   ├── errors.py               # Визначення виключень
│   │   └── base_module.py          # Абстрактний базовий клас для модулів
│   ├── modules/
│   │   ├── __init__.py             # Ініціалізація модуля модулів
│   │   ├── sim7020.py              # Реалізація для SIM7020
│   │   ├── sim7000.py              # Реалізація для SIM7000
│   │   └── quectel_bc95.py         # Реалізація для Quectel BC95
│   ├── integrations/
│   │   ├── __init__.py             # Ініціалізація модуля інтеграцій
│   │   ├── blynk.py                # Інтеграція з платформою Blynk
│   │   ├── mqtt.py                 # MQTT-інтеграція (в майбутньому)
│   │   └── http.py                 # Обробка HTTP-запитів
│   ├── utils/
│   │   ├── __init__.py             # Ініціалізація утиліт
│   │   ├── logger.py               # Конфігурація та використання логування
│   │   ├── config.py               # Завантаження та валідація конфігурації
│   │   └── helpers.py              # Утиліти для повторних спроб та форматування
│   ├── models/
│   │   ├── __init__.py             # Ініціалізація моделей
│   │   ├── command.py              # Модель AT-команди
│   │   ├── state.py                # Модель стану модуля
│   │   └── response.py             # Модель відповіді від модуля
│   └── main.py                     # Основний скрипт для запуску бібліотеки (опціонально)
├── tests/
│   ├── __init__.py                 # Ініціалізація тестового пакету
│   ├── test_at_command.py          # Тестування роботи AT-команд
│   ├── test_blynk.py               # Тестування інтеграції з Blynk
│   ├── test_sim7020.py             # Тестування SIM7020
│   ├── test_sim7000.py             # Тестування SIM7000
│   └── test_quectel_bc95.py        # Тестування Quectel BC95
├── docs/
│   ├── conf.py                     # Конфігурація документації Sphinx
│   ├── index.rst                   # Головний файл документації
│   ├── modules.rst                 # Автогенерація документації по модулям
│   └── tutorials/                  # Навчальні посібники (опціонально)
├── examples/
│   └── example_usage.py            # Приклад використання бібліотеки
├── .gitignore                      # Файли та папки, виключені з Git
├── README.md                       # Опис бібліотеки
├── pyproject.toml                  # Конфігурація проекту
├── requirements.txt                # Залежності проекту
├── .env                            # Файл середовища (необов'язково)
└── LICENSE                         # Ліцензія проекту
```

Рис. 2 Структура розробленої бібліотеки
Fig. 2 The structure of the developed library

Основні структурні елементи бібліотеки будуть наступними:

gsm_nbiot_lib/ — кореневий пакет, який об'єднуватиме всі внутрішні модулі.

core/ — міститиме реалізацію основної функціональності: обробку AT-команд (at_command.py), парсинг відповідей (command_parser.py), керування мережевими з’єднаннями (connection.py), обробку помилок (errors.py) та абстракції модулів (base_module.py).

module/ — включатиме реалізації для конкретних пристроїв, таких як SIM7020 і SIM7000.

integration/ — надаватиме засоби інтеграції з платформами Blynk, MQTT і HTTP.

utils/ — включатиме допоміжні інструменти: системи журналювання, конфігураційні засоби та службові функції.

models/ — визначатиме структури даних для AT-команд і відповідей.

main.py — слугуватиме демонстраційним скриптом запуску та використання бібліотеки.

tests/ — включатиме модульні тести для ключових компонентів із використанням фреймворків pytest і unittest.

docs/ — зберігатиме документацію, згенеровану засобами Sphinx і доступну в онлайн-форматі.

examples/ — міститиме практичні сценарії використання функціоналу бібліотеки.

Файли конфігурації проєкту — README.md, pyproject.toml, requirements.txt, .env, LICENSE та інші файли, які забезпечуватимуть управління проєктом, налаштування середовища та юридичну базу.

Таке розділення функціональностей на ізольовані пакети забезпечить чітке зонування відповідальності кожного модуля, що, у свою чергу, мінімізуватиме внутрішні залежності, знижуватиме ризики каскадних помилок і спрощуватиме налагодження та супровід системи. Передбачатиметься також можливість цільового тестування кожного компонента або зовнішньої інтеграції, що дозволить досягти повного покриття тестами та своєчасного виявлення потенційних проблем.

Під час тестування будуть використовуватися методи імітації апаратної взаємодії, що дасть змогу перевіряти логіку бібліотеки незалежно від фізичного обладнання. Завдяки модульній побудові, бібліотеку можна буде легко доповнювати новими можливостями або підтримкою додаткових GSM-модулів без значних змін в існуючій кодовій базі.

Висновки

Проведене дослідження виявило істотний брак універсальних і водночас оптимізованих рішень для взаємодії з GSM-модулями у середовищі MicroPython, особливо в контексті використання технологій NB-IoT. Аналіз поширених бібліотек (pySerial, GSMComm, Adafruit FONA, TinyGSM, GSM для Arduino) засвідчив, що хоча вони й реалізують базовий GSM-функціонал, їх ефективність на малопотужних мікроконтролерах обмежена апаратною залежністю, відсутністю модульності, обмеженою обробкою помилок або несумісністю з MicroPython.

Це зумовило потребу у створенні нової спеціалізованої бібліотеки для MicroPython, яка відповідала б таким ключовим вимогам:

- повна інтеграція з середовищем MicroPython;
- модульна архітектура для масштабованості та повторного використання;
- розвинені механізми обробки помилок і відновлення зв’язку;
- підтримка сучасних IoT-протоколів (MQTT, HTTP);
- енергоефективність для автономних пристроїв;
- наявність документації та засобів тестування.

Розроблена бібліотека реалізує ці вимоги завдяки чітко структурованій архітектурі, заснованій на принципах об’єктно-орієнтованого програмування та модульності. Її структура охоплює ядро для базової логіки, окремі модулі для специфічних GSM-пристроїв, утиліти, інтеграційні компоненти та моделі для уніфікації даних. Такий підхід забезпечує легкість масштабування, повторне використання коду та зручність супроводу.

Таким чином, запропонована бібліотека закладає основу для формування нового стандарту взаємодії з GSM-модулями у середовищі MicroPython та відкриває перспективи для розробки високонадійних IoT-систем з підтримкою NB-IoT.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. PySerial 3.0 Documentation [Електронний ресурс] // PySerial : офіційний сайт. URL: https://pythonhosted.org/pyserial (дата звернення: 26.03.2025).
2. GSMComm for .NET 2.0 [Електронний ресурс] // Apponic : сайт спільноти розробників. URL: https://gsmcomm-for-net-2-0.apponic.com (дата звернення: 28.03.2025).
3. Adafruit FONA Library 1.0 Documentation [Електронний ресурс] // Arduino : документація бібліотек. URL: https://docs.arduino.cc/libraries/adafruit-fona-library/ (дата звернення: 05.05.2025).
4. TinyGSM Documentation [Електронний ресурс] // Arduino : документація бібліотек. URL: https://docs.arduino.cc/libraries/tinygsm/ (дата звернення: 15.05.2025).
5. GSM Documentation [Електронний ресурс] // Arduino : документація бібліотек. URL: https://docs.arduino.cc/libraries/gsm/ (дата звернення: 17.05.2025).
6. MicroPython documentation [Електронний ресурс] // MicroPython : офіційна документація. URL: https://docs.micropython.org/en/latest/ (дата звернення: 21.05.2025).

REFERENCES

1. PySerial 3.0 Documentation, PySerial, 2024. [Online]. Available: https://pythonhosted.org/pyserial. [Accessed: Mar. 26, 2025].

2. GSMComm for .NET 2.0, Apponic, 2024. [Online]. Available: https://gsmcomm-for-net-2-0.apponic.com. [Accessed: Mar. 28, 2025].
3. Adafruit FONA Library 1.0 Documentation, Arduino, 2024. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/libraries/adafruit-fona-library/. [Accessed: May 5, 2025].
4. TinyGSM Documentation, Arduino, 2024. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/libraries/tinygsm/. [Accessed: May 15, 2025].
5. GSM Documentation, Arduino, 2024. [Online]. Available: https://docs.arduino.cc/libraries/gsm/. [Accessed: May 17, 2025].
6. MicroPython Documentation, MicroPython, 2024. [Online]. Available: https://docs.micropython.org/en/latest/. [Accessed: May 21, 2025].

Lupandin Antonii
Master of Computer Sciences
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine
e-mail: anlupandin@icloud.com;
https://orcid.org/0009-0002-7591-5152

Khruslov Maksym
PhD in Physical and Mathematical Sciences, Head of the Department of Computer Systems and Robotics, Senior Researcher, Associate Professor
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine
e-mail: maksym.khruslov@karazin.ua;
https://orcid.org/0000-0001-9639-9340

Kopieikin Volodymyr
Senior Lecturer at the Department of Computer Systems and Robotics
V. N. Karazin Kharkiv National University, 4 Svobody Sq., Kharkiv, 61022, Ukraine
e-mail: volodymyr.kopieikin@karazin.ua; vertexyz@gmail.com;
https://orcid.org/0009-0009-6845-7211

Design and Prospects for Developing a Modular GSM Library for MicroPython with NB-IoT Support

Relevance. In the context of the growing popularity of the Internet of Things (IoT), the development of software compatible with limited hardware resources is becoming increasingly relevant. NB-IoT technology provides energy-efficient communication for autonomous devices; however, its integration within the MicroPython environment remains insufficiently addressed due to the limitations of existing GSM libraries. The issue of effective interaction between microcontrollers and GSM modules necessitates the development of adapted tools.
Purpose. The aim of this work is to analyze current libraries for interaction with GSM modules, with an emphasis on NB-IoT projects, and to formulate the requirements for a new library optimized for the MicroPython environment.
Research Methods. A comparative analysis was conducted of the functional capabilities, architecture, and compatibility of five common libraries: pySerial, GSMComm, Adafruit FONA, TinyGSM, and GSM (Arduino). The research was carried out according to criteria such as AT command support, energy efficiency, extensibility, error handling, and suitability for MicroPython.
Results. It was found that none of the analyzed libraries provide full support for the MicroPython environment without limitations. The main drawbacks include the lack of modularity, low adaptability to NB-IoT, and limited error handling. Based on the analysis, the concept of a new library with a modular architecture adapted to MicroPython was formulated, including separate modules for AT commands, network handling, error processing, and integration with IoT protocols (MQTT, HTTP). A structural model of the library and UML diagrams of its components were proposed.
Conclusions. The study confirms the need to create a new specialized GSM library that would combine flexibility, energy efficiency, and ease of integration with MicroPython for use in NB-IoT devices. The proposed architectural solutions aim to reduce the load on hardware, ensure stable communication, and simplify the development of IoT projects.

Keywords: *GSM, NB-IoT, MicroPython, AT commands, modular architecture, IoT, energy efficiency, pySerial, GSMComm, Adafruit FONA, TinyGSM, Arduino.*

Надійшла у першій редакції 10.03.2025, в останній - 12.04.2025.
The first version has been received on 10.03.2025, the final version – on 12.04.2025.

DOI: 5https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-06

УДК (UDC) 004.93

Мірошник Марина Анатоліївна *докт. техн. наук, професор; професор кафедри комп'ютерних систем та робототехніки, ННІ комп'ютерних наук та штучного інтелекту, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи 6, м. Харків, Україна, 61022*
e-mail: m.miroshnyk@karazin.ua ; https://orcid.org/[0000000222312529]

Шматков Сергій Ігорович *докт. техн. наук, професор; професор кафедри комп'ютерних систем та робототехніки, ННІ комп'ютерних наук та штучного інтелекту, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, майдан Свободи 6, м. Харків, Україна, 61022*
e-mail: s.shmatkov@karazin.ua; https://orcid.org/0000-0002-0298-7174

Стрілець Вікторія Євгенівна *канд. техн. наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та робототехніки, ННІ комп'ютерних наук та штучного інтелекту, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022*
e-mail: viktoria.strilets@karazin.ua ; https://orcid.org/0000-0002-2475-1496

Зац Олександр Дмитрович *аспірант ННІ комп'ютерних наук та штучного інтелекту, Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, майдан Свободи, 6, Харків, Україна, 61022*
e-mail: zats2021ki51@student.karazin.ua
https://orcid.org/0000-0002-7623-9187

Дослідження комп'ютерних систем для виявлення вторгнень та мережевих аномалій

Стаття присвячена опису моделей систем виявлення вторгнень та мережевих аномалій з квантовим автокодуванням у комп'ютерних системах. У роботі запропоновано інноваційні методи дослідження систем виявлення вторгнень та мережевих аномалій з квантовим автокодуванням у комп'ютерних системах, здатні забезпечувати швидке реагування і високий рівень адаптивності. Представлена модель квантового автокодера (QAE) для систем виявлення вторгнень для виявлення аномалій. QAE – це оптимізаційна модель, отримана на основі автокодерів, які включають методи відсікання, кластеризації та цілочисельного квантування.

Актуальність роботи полягає у можливості дослідження систем виявлення вторгнень та мережевих аномалій з квантовим автокодуванням у інформаційно-комунікаційних системах. Дослідження було спрямоване на **розробку методу виявлення аномальних атак** в мережевому трафіку IoT, оскільки виявлення аномалії вимагає ретельного спостереження за різними мережевими трафіками. Крім того, мережевий трафік кожного IoT-пристрою відрізняється. Тому у цьому дослідженні використовується алгоритм автокодера для виявлення аномалій. Під час навчання моделі використовувався доброякісний мережевий трафік, очікуючи, що будь-який аномальний трафік призведе до помилки реконструкції аномалії (RE).

Методи дослідження. Методи дослідження систем виявлення вторгнень та мережевих аномалій з квантовим автокодуванням у інформаційно-комунікаційних системах є імовірнісне, верифікаційне моделювання, та використання хмарних обчислень, які надають гнучкість, масштабованість та ресурси для побудови ефективних систем виявлення комп'ютерних атак.

Результати. Було згенеровано набір даних для Інтернету речей в режимі реального часу для звичайного і атакуючого трафіку. Модель автокодера працює з нормальним трафіком на етапі навчання. Потім ця ж модель використовується для реконструкції аномального трафіку, припускаючи, що помилка реконструкції (RE) аномалії буде високою, що допомагає ідентифікувати атаки. Крім того, було вивчено продуктивність автокодерів, використовуючи точність, точність, пригадування і оцінку за допомогою великого експериментального дослідження.

Висновки. Результати показують, що існує компроміс між автокодером і моделлю QAE-u8 в контексті точності та параметрів оцінки процесора, таких як пам'ять і центральний процесор. Таким чином, можна підсумувати, що існує компроміс між автокодером і моделлю QAE-u8 в контексті точності та параметрів оцінки процесора, таких як пам'ять і центральний процесор. У майбутніх дослідженнях планується зосередитися на інших вразливостях пристроїв IoT, щоб розробити більш безпечну інфраструктуру IoT.

Наукова новизна даної роботи полягає в розробці підходів і методів виявлення аномальних атак в мережевому трафіку IoT.

Ключові слова: *комп'ютерна система, системи виявлення вторгнень, системи виявлення мережевих аномалій, квантове автокодування.*

Як цитувати: Мірошник М. А., Шматков С. І., Стрілець В. Є., Зац О. Д. Дослідження комп'ютерних систем для виявлення вторгнень та мережевих аномалій. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання.*

© Мірошник М. А., Шматков С. І., Стрілець В. Є., Зац О. Д., 2025
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління. 2025. вип. 65. С.67-82. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-06

How to quote: M. Miroshnyk, S. Shmatkov, V. Strilets, and O. Zats, "Investigation of computer systems to detect intrusions and network anomalies". *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 65, pp. 67-82, 2025. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-06 [in Ukrainian]

1 Вступ

Впровадження технології Інтернету речей (IoT) у різні сфери господарства вимагає постійного підключення до мережі та обміну даними. Мережі та пристрої IoT можуть стати об'єктом кібер атак для перенапрямлення, злочинного користування або викрадення трафіку. Дане дослідження було спрямоване на розробку методу виявлення аномальної поведінки в мережевому трафіку IoT. Виявлення аномалії вимагає ретельного спостереження за різним мережевим трафіком IoT. У роботі розглянуто мережевий трафік IoT, отриманий в реальному часі з чотирьох основних пристроїв: ThingSpeak-LED, MQTT-Temp (MQTT сенсор), Amazon-Alexa (голосовий помічник) та Wipro-Bulb (розумна лампа). Для кожного IoT-пристрою мережевий трафік відрізняється. Для виявлення атак (аномалій) у трафіку запропоновано використати модель автоенкодера, яка має навчатися на даних за трафіком без атак, припускаючи, що будь-який аномальний трафік призведе до значної помилки реконструкції (RE).

Існує кілька типів кібер атак, які розглядають в IoT мережах. Розподілена атака на відмову в обслуговуванні (DDoS) є однією з найбільш критичних загроз для IoT пристроїв. Такі IoT пристрої як веб-камери, пристрої спостереження за дітьми або принтери через їх вразливість і поширеність є основними цілями для запуску DDoS-атаки для формування ботнету. Атаковані IoT пристрої перенаправляють великий обсяг трафіку на сервери, що призводить до їх несправності.

Атака грубої сили на Secure Shell (SSH) – це ще одна відома кібератака, яка використовує метод проб і помилок для перебору всіх можливих комбінацій для зламу пароля. Більшість пристроїв IoT надають віддалений доступ через протокол SSH з паролями за замовчуванням, що робить їх вразливими до атак даного типу. Зловмисники використовують SSH-атаки грубого перебору з відомими обліковими даними, щоб отримати доступ і експлуатувати пристрої IoT. Якщо пристрій зазнав атаки грубого перебору SSH, то це може призвести до DDoS-атак, і ці дві атаки є шляхом для подальшої несанкціонованої експлуатації. У даному дослідженні увага спрямована на виявлення цих двох найбільш значущих атак на IoT пристрої.

Останніми роками IDS-системи для пристроїв IoT інтегрували методи неконтрольованого навчання (unsupervised learning, або навчання без вчителя). У неконтрольованому навчанні виявлення аномалій є задачею, яка використовується для ідентифікації спостережень, що відхиляються від нормальних подій. Потенційна можливість значної шкоди, спричиненої аномальними діями, робить задачу виявлення атак критично важливою в кіберпросторі. Існують дослідження, у яких запропоновано методи неконтрольованого навчання на основі різних наборів даних мережевого трафіку для перевірки певних систем IDS. Однак виокремити конкретні пристрої IoT у більшості наборів даних складно, а отже, і виявити аномалію в інфраструктурі IoT не просто.

2 Постановка задачі

Із зростанням складності комп'ютерних систем та активним розвитком інтернет-технологій кіберзагрози стають все більш витонченими та масштабними. В останні роки багато дослідників зосередилися на неконтрольованому навчанні для виявлення мережевих аномалій у периферійних пристроях з метою виявлення комп'ютерних атак. Розгортання моделі неконтрольованого автокодера вимагає значних обчислювальних витрат на периферійних пристроях з обмеженими ресурсами.

У дослідженні запропоновано використати **модель квантового автокодера** (QAE) для системи виявлення вторгнень – оптимізаційна модель на основі автокодерів, до якої включені методи відсікання, кластеризації та цілочисельного квантування. Квантовий автокодер uint8 і квантовий автокодер float16 – це два варіанти, які створені для розгортання дорогих в обчислювальному плані моделей штучного інтелекту (ШІ) в пристроях Edge.

У роботі розглянуто згенерований мережевий трафік за допомогою пристроїв IoT, що працюють в режимі реального часу, за наявності (атакуючий трафік) та відсутності атак

(нормальний трафік). Модель автокодера працює з нормальним трафіком на етапі навчання. Потім навчена модель використовується для реконструкції аномального трафіку, припускаючи, що помилка реконструкції аномалії (**RE**) буде високою, що допомагає ідентифікувати атаки. Крім того, проведено дослідження ефективності автокодерів QAE-u8 і QAE-f16 з використанням показників точності та оцінки F1 на основі експериментальних досліджень. Таким чином, у роботі розглянуто мережевий трафік IoT в реальному часі для чотирьох пристроїв: ThingSpeak-LED, MQTT-Temp, Amazon-Alexa та Wipro-Bulb.

Пристрої IoT, на відміну від графічних і центральних процесорів загального призначення, підтримують додатки з обмеженими фізичними ресурсами. Розгортання фреймворку IDS з використанням ШІ в цих пристроях накладає обчислювальні обмеження, такі як обмежений обсяг пам'яті, менша кількість ALU, високий процесорний час тощо. За таких умов безпосередня реалізація алгоритмів ШІ, що споживають багато пам'яті, є ненадійною без оптимізації. Вирішенням цієї проблеми є оптимізація алгоритмів ШІ для IoT пристроїв. Нейронні мережі в оптимізації ШІ містять відсіканя мережі та цілочисельне квантування. Процес відсікання мережі включає видалення надлишкових нейронів, які суттєво не впливають на точність моделі. Це допомагає зменшити обсяг пам'яті та призводить до зниження енергоспоживання. Крім того, можна зменшити значення вагових коефіцієнтів та функції активації, перетворивши загальновживане 32-бітне представлення з плаваючою комою до 16-бітної та 8-бітної цілочисельної точності. Цей процес реалізує техніку пост-квантифікації. Операції над цілими числами зменшують накладні витрати порівняно з операціями з плаваючою комою і зменшують час і складність обчислень [1, 2].

3 Огляд літератури

У [1] описано систему виявлення вторгнень з квантованим автокодуванням для виявлення аномалій в пристроях IoT з обмеженими ресурсами з використанням набору даних RT-IoT. Пропонується модель квантованого автокодера для систем виявлення вторгнень з метою виявлення аномалій. Показано, що розроблена модель перевершує всі інші моделі, зменшуючи середнє використання пам'яті, стиснення пам'яті та пікове використання процесора. Запропонована модель більше підходить для розгортання на периферійних пристроях IoT з обмеженими ресурсами.

У роботі [2] розглянуто підходи до класифікації методів виявлення аномалій у системах, спрямованих на ідентифікацію атак. Проведено аналіз та огляд популярних груп методів, використаних для виявлення аномалій. Зазначено, що ці методи мають низький рівень формалізації для створення моделей атак, а також складнощі з оцінкою їхньої обчислювальної складності, коректності та завершеності.

У [3] розроблено модель виявлення вторгнень на основі покращеного трансформатора. В роботі проаналізовано традиційні алгоритми машинного навчання, методи глибокого навчання та розглянуто переваги використання трансформерних моделей. Запропоновано метод виявлення вторгнень у комп'ютерних мережах, який відрізняється від відомих підходів використанням алгоритму глибокого навчання та включає процедури зменшення кореляції вхідних даних та перетворення даних у певний формат, необхідний для роботи моделі.

У [4] показано, що віртуалізація мереж є сучасним підходом до підвищення ефективності функціонування комп’ютерних мереж. Запропоновано інтегрувати віртуалізацію з методами машинного навчання, зокрема шляхом створення моделі оптимізації мережі на основі графових нейронних мереж. Такий підхід дозволяє врахувати складну взаємодію між топологією мережі, маршрутизацією та вхідним трафіком, забезпечуючи точне прогнозування розподілу затримок і втрат. Проведено аналіз існуючих методів оптимізації мереж та розглянуто віртуалізацію як ефективний інструмент для вдосконалення їх роботи.

У роботі [5] розроблено моделі діагностування інтерактивних комп’ютерних мереж на структурно-логічному рівні, а також методи діагностування, що враховують особливості їх функціонування. Запропоновано методи та процедури синтезу одновимірних і двовимірних мереж із розподіленим управлінням конфігурацією. Проведено аналіз існуючих підходів до діагностування таких мереж, що дозволило створити ефективні моделі діагностики. За результатами проведених експериментів було оцінено тестопридатність розглянутих мереж, підтвердивши їхню функціональність і відповідність поставленим вимогам.

У роботі [6] представлено застосування методу пошуку аномалій для виявлення мережевих атак. Дослідження присвячене моделі виявлення мережевих вторгнень у трафіку, сформованому на основі стека протоколів TCP/IP. Проведено аналіз основних об’єктів локальної обчислювальної мережі та визначено ключові параметри для контролю кожного типу об’єктів. У роботі запропоновано методи пошуку аномалій, які базуються як на аналізі за заздалегідь визначеними правилами, так і на використанні ймовірнісних моделей. Розроблена модель системи забезпечує виявлення атак на ключові об’єкти, що піддаються моделюванню.

У роботі [7] запропоновано методи створення тестів для інтерактивних комп'ютерних мереж на структурно-логічному рівні. Для таких мереж розроблені методи синтезу перевіряючих послідовностей з використанням циклічних, відмінних і характеристичних символів в автоматній моделі комірки мережі. Розроблений новий підхід до модифікації автоматної діаграми комірки, яка не має відмінної послідовності. Цей метод включає введення додаткового вхідного символу та використання кодів станів, які формують Гамільтонів цикл у послідовності переходів. Також представлені методи та процедури для синтезу одновимірних і двовимірних мереж з розподіленим управлінням конфігурацією.

У роботі [8] запропоновано застосування систем запобігання та виявлення вторгнень для забезпечення комплексного захисту мережі. На основі порівняльного аналізу цих систем було виявлено їхні недоліки, а також сформульовано вимоги для створення так званої "суперсистеми", здатної ефективно запобігати та виявляти кібератаки і вторгнення.

У роботі [9] розглянуті методи виявлення аномалій на етапі попередньої обробки даних, зокрема методи стандартного відхилення, локального рівня викидів і ізолюючого лісу. Визначена залежність між числом виявлених аномалій і пороговими значеннями для кожного з цих методів. Якість попередньої обробки даних оцінювалась за допомогою класифікаторів, побудованих на основі методів K-найближчих сусідів і беггінгу.

У роботі [10] досліджено методи виявлення аномалій у наборах даних під час управління процесами в державних системах. Основну увагу приділено вибору метрик для оцінювання точності виявлення викидів, а також визначенню ефективних математичних моделей і методів для розв’язання задачі виявлення аномалій у пробних вибірках. Отримані результати включають: огляд метрик, що застосовуються для оцінки ефективності математичних моделей і методів виявлення аномалій, огляд традиційних підходів і методів глибокого навчання для виявлення викидів, аналіз ефективності та якості моделей і методів на основі 12 пробних вибірок.

У роботі [11] проведено аналіз та прогнозування характеристик комп’ютерної мережі, зокрема досліджено трафік з позиції часових рядів. Розглянуто моделі трендів у часових рядах, критерії їх виявлення та методи оцінювання. Для оцінки тренду було обрано основний метод тест Манна-Кендалла, результати якого інтерпретовано за допомогою методу консенсусу. Розв’язано задачу прогнозування трафіку комп’ютерної мережі з урахуванням трендових показників та вирішено задачу збору та попередньої обробки даних про роботу комп’ютерної мережі, включаючи формалізацію, кількісний і якісний аналіз, створено унікальний набір даних шляхом парсингу логів (системних файлів) моніторингу трафіку, який використано для побудови моделей виявлення трендів та прогнозування мережевих характеристик.

У роботі [12] було проведено аналіз характеристик систем виявлення мережевих вторгнень в інформаційні системи та ідентифікації ознак комп'ютерних атак на підприємствах. Розглянуто можливі дії зловмисників та досліджено методи і принципи налаштування оптимальних систем виявлення мережевих вторгнень. Проаналізовано потенціал розробки та застосування комп'ютеризованих систем для виявлення вторгнень у мережу, а також вивчено властивості комп’ютерних атак у сучасних умовах. Розроблено рекомендації для впровадження систем виявлення атак, вторгнень та ознак кібератак. Пропоновані рішення спрямовані на подальшу інтеграцію цих систем у загальну архітектуру захисту інформації будь-якої організації.

У роботі [13] зазначено, що жоден метод захисту від кібератак не може гарантувати повний захист від проникнення зловмисника в комп’ютерну мережу. У випадку злому важливо оперативно виявити порушення, припинити доступ, провести розслідування та усунути вразливості. Для цього застосовуються методи, які допомагають виявляти аномалії та зловживання. Розглянуто використання частотного методу для виявлення аномалій в системі шляхом аналізу ентропії журналу подій. Цей метод дозволяє виявляти аномалії в мережевому трафіку, а також аналізувати журнали подій на хостах для виявлення несанкціонованих дій. Дослідження на основі журналу подій ОС Windows показало, що перевищення порогових значень

кількості різних повідомлень у журналі можна виявити через аналіз ентропії, що допомагає виявляти аномалії в роботі комп'ютерної мережі. Запропонований метод можна інтегрувати в системи виявлення вторгнень, що дозволить швидко інформувати адміністратора безпеки про зловживання та атаки.

У роботі [14] запропоновано інтелектуальну систему, що виявляє аномалії та ідентифікує пристрої розумних будинків, які використовують колективну комунікацію. Ідея запропонованої системи полягає в об'єднанні розумних будинків в одну комп'ютерну мережу з метою підвищення безпеки як для окремого будинку, так і для всієї мережі в цілому. Однією з переваг цієї системи є зв'язок між кластерами розумних будинків, що дозволяє обмінюватися інформацією про профілі розумних пристроїв в білих списках кожного з кластерів, що додає рівень безпеки на всіх рівнях мережі.

У роботі [15] проведено аналіз сучасних систем виявлення та запобігання вторгнень в інформаційно-телекомунікаційних системах. Для забезпечення захисту як відкритої, так і обмеженої інформації пропонується використовувати комбінацію програмних і апаратних засобів, що забезпечують моніторинг, аналіз і контроль роботи інформаційно-телекомунікаційної системи (ІТС). Серед таких засобів виділяються: міжмережеві екрани, антивірусні програми та системи виявлення та системи виявлення і запобігання вторгнень. У разі захисту існуючих ІТС існує безліч підходів до створення комплексного захисту, який потрібно обирати залежно від розміру ІТС. Для невеликих ІТС достатньо налаштувати міжмережевий екран і антивірусну систему, тоді як для середніх та великих ІТС, наприклад, у випадку хостинг-провайдерів, необхідно застосовувати більш потужні механізми захисту, такі як системи виявлення і запобігання вторгнень.

4 Опис еталонних наборів даних мережевого трафіку

У ШІ критичний аналіз і оцінка системи IDS залежать від типу набору даних, обраного на етапах навчання і тестування. Набір даних DARPA є найпопулярнішим набором даних для мережевих IDS, він містить 41 характеристику в пакетному форматі. Найпоширеніші атаки включають DoS, сканування портів, R2L та U2R. Незважаючи на широке розповсюдження, DARPA страждає від високої надмірності. Набір даних CICIDS містить 80 атрибутів і двонаправлені мережеві траси на основі потоків, він включає трафік ботнетів, DoS, SSH-атак, інфільтрації та веб-атак, які генерували як сервери, так і персональні комп'ютери.

Дослідники з галузі кібербезпеки розробили набір даних UNSW-NB за допомогою інструмента IXIA Perfect Storm. Цей набір даних містить як пакетні, так і часові характеристики. Сімейство атак включає DDoS, DoS, розвідку та крадіжку. Крім того, UNSW запропонувала набір даних BoT-IoT з 72 мільйонів трас, в якому для імітації трафіку IoT використовувався Node-RED, інструмент моделювання проміжного програмного забезпечення. Автори BoT-IoT розробили JavaScript для віртуальних метеостанцій з використанням датчиків IoT, таких як тиск, вологість і температура, і обмінювалися даними через протокол передачі телеметрії в черзі (Message Queuing Telemetry Transport, MQTT). Основні атаки в цьому наборі даних включають DoS і крадіжку інформації. Себастьян Гарсія та Еркіага зібрали набір даних IoT у стратосферній лабораторії університету CTU. Набір даних містить 23 знімки різних мереж, створених на пристроях Raspberry Pi. Набір IoT включав безпечний трафік, зібраний з Amazon Echo, Philips HUE LED Light та розумних дверних замків Somfy Smart. У цьому наборі даних безпечний і шкідливий трафік був захоплений на різних пристроях, що призвело до створення окремих мереж.

У роботі [1] наведено загальнодоступні еталонні набори даних для дослідників. Дослідження показує, що більшість досліджених наборів даних не є частиною інфраструктури IoT. Незважаючи на те, що IoT використовував середовище в реальному часі, сліди атак і доброякісні сліди генерувалися в іншому середовищі. Крім того, в IDS на основі аномалій потрібно повністю аналізувати поведінку всіх пристроїв IoT, щоб виявити нову аномалію в мережі. Тому в даній роботі пропонується розглядати нормальний і атакуючий трафік в одній і тій же мережевій інфраструктурі з пристроями IoT.

5 Огляд методів машинного навчання для виявлення атак

Thudumu представили багаторівневу гібридну IDS для захисту внутрішньотранспортних мереж (IVN) і зовнішніх автомобільних систем від атак. Запропонована модель складається з чотирирівневої мережі. Для виявлення відомих атак були використані деревоподібні моделі ML, такі як дерево рішень (DT), додаткові дерева (ET), випадковий ліс та екстремальний градієнтний

бустинг (XGBoost). Розробка системи виявлення аномалій інтегрувала CL-k-середні, байєсівську оптимізацію з гаусівським процесом (BO-GP) та упереджені класифікатори, в ній зосередилися на виявленні вторгнень у внутрішньотранспортні мережі, використовуючи два загальнодоступних набори даних CICIDS і CAN-intrusion. Дані набори є високо розмірними, тобто мають атрибути, які можуть бути незалежними. У такому випадку можуть поставати проблеми, пов'язані з «прокляттям розмірності».

Eskandari запропонували Passband, інтелектуальний наскрізний дизайн IDS для шлюзів IoT. Цей метод використовує алгоритми Isolation Forest (IF) та Local Outlier Factor (LOF) для виявлення аномалій. Цей метод було протестовано проти сканування портів, SYN-флуду, HTTP- і SSH-атак грубої сили. Метод IF є більш стабільним, ніж LOF, але модель має високу завантаженість процесора. У дослідженні було проведено порівняння класифікатора Ridge, логістичної регресії та ансамблевого методу з точки зору складності та точності реєстрації часу. Виявлено, що продуктивність залежить від характеру набору даних і параметрів, що використовуються під час тестування.

У [1, 3] запропоновано IDS з використанням оптимізації рою частинок (PSO). У роботі застосовано методи вилучення ознак на основі рою частинок для оптимізації алгоритмів машинного навчання (ML). У цій роботі автор застосував PSO до алгоритму дерева рішень (PSO + DT) та алгоритму K-найближчого сусіда (PSO + KNN) для набору даних KDD-CUP99. Алгоритм PSO + KNN показав кращі результати порівняно з іншими алгоритмами. Оскільки набір даних не містить слідів IoT, розгортання на пристроях IoT є недоречним. Також запропоновано модель IDS Stacked Attention Autoencoder (SAAE), в якій шар механізму уваги знаходиться між кодером і прихованим шаром. Цей шар обчислює вектор уваги всіх ознак, щоб визначити внесок кожного атрибуту. Запропонований алгоритм може досягти високої точності у змодельованому середовищі.

Також запропоновано гібридна техніка глибокого навчання для бот-мереж, яка об'єднує автокодер Long Short (LAE) з глибокою двонаправленою довгою короткочасною пам'яттю (BLSTM) для виявлення вторгнень у камерах спостереження. Класифікація атак Mirai та BASHLITE IoT здійснюється шляхом оцінки та тестування мережевого трафіку на різних камерах, включаючи Samsung SNH 1011N, XCS7-1.003-WHT, Simple Home XCS7-1.002WHT та Provision PT-838. Досягнуто кращих показників з точки зору точності. Однак модель зазнала високих втрат при класифікації TCP- і SCAN-атак (Zhang). Для оптимізації алгоритму глибокої нейронної мережі (DNN) розглянуті різні методи стиснення, такі як обрізка, кластеризація і квантування. Для перевірки здатності до стиснення та коректності ResNet18 у цьому дослідженні представлено метод квантування зі збереженням розрідженості та кластерів (PCQAT).

Модель AS-IDS призначена для виявлення атак як на основі сигнатур, так і на основі аномалій, використовуючи набір даних NSL-KDD. Ця модель включає алгоритми Deep Q-Learning, в якому вихідний рівень використовує відношення сигнал/шум (SNR) і пропускну здатність для класифікації (Otoum and Nayak). Існує також модель згорткової нейронної мережі (CNN) для IDS для виявлення викидів. Ця модель використовує набір даних NID та набір даних BoT-IoT для перевірки. Однак модель CNN занадто складна для розгортання з обмеженими ресурсами. Gong застосував модель VecQ для стиснення алгоритмів DNN з використанням наборів даних MNIST, ImageNet, CIFAR, текстів THUCNews та рецензій на фільми IMDB. Параметризація методу оцінки ймовірності, що використовується в процесі квантування, дозволила цій моделі досягти вищої точності. Метод стиснення One-shot pruning quantization (OPQ) для алгоритму DNN вирішує проблему ручного налаштування шляхом використання попередньо навчених вагових параметрів для обчислення розподілу стиснення та спільного використання одного кодового дерева для всіх каналів на кожному рівні замість традиційного квантування по каналах. Однак ці дослідження не враховують обчислювальну складність алгоритмів ШІ на пристроях IoT в режимі реального часу, яка включає в себе споживання пам'яті, навантаження на процесор і час обробки.

У [1] показано різні підходи до оптимізації IDS. Використання алгоритмів ШІ для виявлення атак підвищить продуктивність IDS (Lakhan; Verhelst and Moons). Маючи величезні переваги методів ШІ, розгортання IDS у пристроях IoT є складним завданням. Пристрої IoT мають обмежений обсяг пам'яті, низьку пропускну здатність і малу потужність (Thakkar and Chaudhari; Imteaj). У цій роботі представлено дві моделі QAE, такі як QAE-u8 та QAE-f16, використовуючи комбінацію методів обрізки на основі розрідженості, кластеризації та квантування. Емпіричний аналіз також включає в себе дослідження пристроїв Raspberry Pi.

6 Дослідження фреймворку QAE IDS для виявлення аномалій у пристроях IoT

У роботі [1,4] основний внесок полягає в тому, що: (a) згенерований набір даних RT-IoT для нормального та атакуючого мережевого трафіку з використанням інфраструктури IoT з розгортанням пристроїв IoT, таких як ThingSpeak-LED, MQTT-Temp (сенсор), Amazon Alexa (голосовий помічник), Wipro bulb (розумна лампа) та Raspberry Pi, в режимі реального часу; (b) запропоновані оптимізовані моделі QAE-u8 та QAE-f16 для IDS для підтримки пристроїв IoT з обмеженими ресурсами з метою зменшення складності ШІ; (c) отримані оцінки запропонованої моделі, які показали, що QAE-u8 досягла кращих результатів, ніж QAE-f16 та модель автокодера за F1-score.

Обчислювальна складність запропонованої моделі вимірювалась з точки зору часу виконання, використання процесора та пам'яті для розгортання в пристроях з обмеженими обчислювальними можливостями. Запропонована модель QAE-u8 значно перевершує QAE-f16 та еталонні моделі автокодерів. Для цього всі три моделі були змодельовані на пристрої Raspberry Pi.

Фреймворк QAE IDS для виявлення аномалій у пристроях IoT з обмеженими ресурсами, як показано на рис. 1, складається з чотирьох етапів, які пропонують: (a) генерацію набору даних, (b) інженерію ознак, (c) фреймворк автокодера, (d) квантування після навчання [1,5].

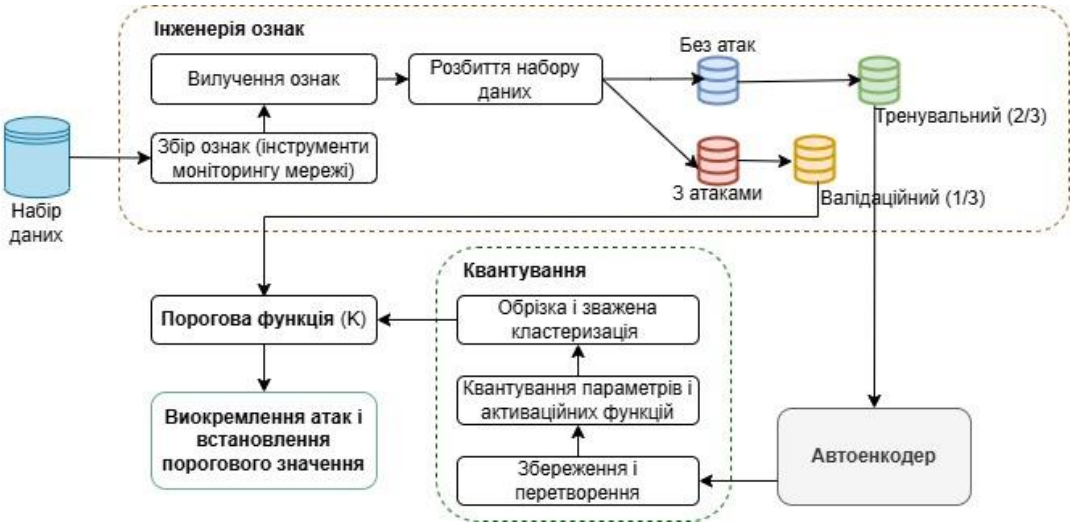


Рис. 1. Система QAE IDS для виявлення аномалій
Fig. 1. QAE IDS anomaly detection system

Створення набору даних є однією з найважливіших задач неконтрольованого навчання. Був запропонований набір даних RT-IoT для навчання та тестування IDS на основі QAE. На рис. 2 показана інфраструктура тестового стенду для генерації набору даних RT-IoT [1,6].

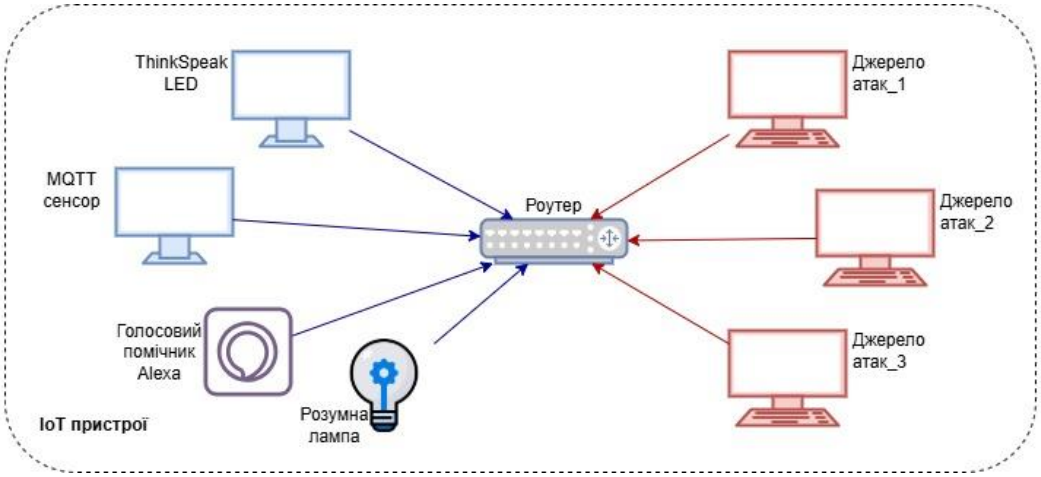


Рис. 2. Інфраструктура набору даних RT-IoT
Fig. 2. RT-IoT data collection infrastructure

Інфраструктура складається з двох частин, а саме: пристроїв-жертв IoT та пристроїв-зловмисників IoT, з'єднаних через маршрутизатор. Мережевий трафік збирається через маршрутизатор за допомогою Wireshark, який є інструментом моніторингу мережевого трафіку з відкритим вихідним кодом і допомагає витягувати траси та конвертувати їх у файл PCAP.

У [1] наведено список пристроїв, операційних систем та відповідних конфігурацій. На цьому наборі даних було створено чотири звичайні профілі та два профілі атаки.

Хмарна платформа *ThingSpeak* – це платформа IoT з відкритим вихідним кодом для візуалізації даних з датчиків та управління виконавчими пристроями. Був створений інтерфейс між платою Intel Galileo Gen 2 та RGB світлодіодним модулем. Згодом за допомогою платформи ThingSpeak здійснюється моніторинг стану світлодіодів. Маршрутизатор записує передачу даних світлодіодного модуля, сполученого з IoT-пристроєм.

Протокол *MQTT* – це протокол публікації/підписки, метою якого є підтримка пристроїв IoT з обмеженими ресурсами для передачі даних з низькою пропускною здатністю. Спочатку встановлюється інтерфейс між пристроєм Raspberry Pi та датчиком температури. Пристрій Raspberry Pi публікує значення температури в MQTT Mosquitto Broker за допомогою бібліотеки Paho MQTT через Інтернет. Використовуючи інструмент Wireshark, можна пасивно відстежити і перехопити внутрішній трафік, в результаті чого збирається набір даних, який містить MQTT-Temp.

Компанія *Wipro* випустила 9-ватну розумну лампу B22 NS9400 як інтегроване рішення для розумного будинку IoT. Мобільні пристрої можуть дистанційно керувати цими лампами за допомогою протоколу WiFi. Набір даних Wipro-Bulb включає повну інформацію про комунікацію *Wipro-Bulb*.

Пристрій *Alexa*, розроблений компанією *Amazon*, підключається до маршрутизатора і перехоплює всю комунікацію на маршрутизаторі. Цей пристрій працює як хмарний голосовий сервіс.

SSH brute-force attack. Механізм автентифікації пристроїв IoT вразливий до атак SSH грубої сили через слабкі паролі. Ця атака не лише підбирає паролі, але й проникає в систему та впроваджує шкідливий код для контролю та атаки на інші підключені пристрої. Допоміжні модулі для входу в SSH, доступні в Metasploit, інструменти з відкритим вихідним кодом, використовуються для генерації трас атаки грубого перебору. Початкова фаза процесу перебору SSH включає в себе сканування портів за допомогою інструменту Network Mapper (Nmap) для виявлення машин з відкритими SSH-портами. Обраний допоміжний модуль 'Scanner SSH' з msfconsole в Metasploit, щоб ініціювати атаку перебором. Msfconsole налаштовується на IP-адресу жертви, ім'я користувача за замовчуванням та файли з паролями для проведення атаки. Після того, як допоміжний модуль успішно зламує облікові дані, встановлюється віддалене з'єднання, що дозволяє отримати доступ до комп'ютера жертви.

Траси *DDoS-атак* були згенеровані за допомогою інструменту Hping3 з декількох IoT-пристроїв Kali Linux. Hping3 – це інструмент з відкритим вихідним кодом, доступний в ОС Kali Linux, який використовується для запуску DDoS-атак на машини-жертви. На початковому етапі створено команду hping3, вказавши IP-адресу та доменне ім'я цільової жертви. hping3 надає функцію сканування 'SYN'. Крім того, була персоналізована конфігурація через встановлення портів джерела, призначення та фрагментацію. Було передано 30 000 TCP SYN-пакетів на пристрій жертви, використовуючи випадкові джерела в процесі атаки. Здатність цих атак щоразу випадково змінювати IP-адреси пристроїв-джерел створює труднощі для адміністраторів у визначенні джерела атак (Jia et al.). Процедура була продовжена на період 120 с, що призвело до генерації значного обсягу пакетів, які перевантажили ресурси комп'ютера-жертви.

Feature Engineering. Зібрані файли PCAP з Wireshark конвертуються і вивантажуються у вигляді CSV-файлів за допомогою інструменту CICFlowmeter.

У [1] показаний повний набір даних RT-IoT. Було згенеровано двонаправлений потік пов'язаних з часом характеристик, які допомагають розрізняти DDoS-атаки. Щоб запобігти надмірному пристосуванню під час навчання, такі ознаки, як адреса джерела, призначення та FlowID, були вилучені. Крім того, числові значення були закодовані для категорійних ознак, таких як протокол і послуга. Також повний набір даних був нормалізований із середнім значенням нуль і стандартним відхиленням одиниця. Для виявлення аномалій нормальний набір даних був позначений нулем, а набір даних атаки – одиницею. Нарешті, на етапі навчання використовується 70% набору даних, а на етапі тестування (валідації) використовується 30% .

7 Дослідження стиснення моделі та зменшення завантаження процесора

Розглянемо побудову фреймворку автокодера для навчання нормальної поведінки мережевого трафіку пристроїв IoT. Автокодер – це модель неконтрольованого навчання на основі методів реконструкції. Механізм алгоритму автокодера полягає в реконструкції тих самих вхідних даних у вихідні дані. При виявленні аномалій ідея використання автокодера полягає в тому, що аномальний трафік не зможе відновити свій вхідний трафік на виході. Отже, помилка виникає через те, що модель навчається виключно на звичайному (нормальному) мережевому трафіку. Модель автокодера складається з прихованих шарів, що мають кодер φ, який перетворює вихідний набір даних χ в латентний простір F для стиснення, та декодер θ, який відновлює вихідний набір даних з латентного простору. Крім того, в кодері можна зменшити кількість прихованих шарів, що дозволить виділити лише суттєву інформацію та ігнорувати шум. Розглянута модель складається з шести прихованих шарів з трьома рівними кодувальниками та декодувальниками, з функцією активації «relu». Оскільки пристрої IoT мають обмежені ресурси, модель автокодера містить процедуру оптимізації, яка складається з обрізання, кластеризації та квантування.

7.1 Післятренувальне квантування

Для зменшення завантаження процесора і пам'яті, наскільки це можливо, при збереженні точності моделі важливою задачею є оптимізація моделі. Щоб оптимізувати модель вже навченого автокодера був застосований метод пост-тренінгового квантування. Цей метод містить обрізання, кластеризацію та квантування. Квантування після навчання складається з кількох кроків.

Першим кроком для стиснення моделі є обрізання. Обрізка – це вибір найбільш значущих нейронів, не беручи до уваги шари з надлишковими або нульовими ваговими коефіцієнтами.

На другому кроці застосовується метод вагової кластеризації. Тут ваги шарів кластеризуються і згодом змінюються на основі центроїдів кластерів. Цей підхід допомагає ще більше зменшити розмір моделі. На основі аналізу компромісу між точністю та кількістю кластерів було обрано вісім кластерів для вагової кластеризації.

Третій крок квантування передбачає перетворення кластеризованої моделі у формат TFlite з метою покращення продуктивності моделі з точки зору процесорної обробки, розміру моделі та використання пам'яті. На цьому кроці всі ваги і зсув у форматі float32 перетворюються у беззнакові 8-розрядні цілі числа та 16-розрядні числа з плаваючою комою.

На останньому етапі квантована модель була навчена і протестована, перш ніж завантажити її на пристрій IoT для остаточних прогнозів. *Алгоритм 1* показує псевдокод для Q-Autoencoder [1,7,8].

Алгоритм 1. Запропонована модель квантованого автокодера для виявлення аномалій
Вхід: тренувальний набір $x_1, \dots, x_n \in R$, кодер φ and decoder θ
Вихід: знайдений поріг

```
procedure Q-Autoencoder
    Repeat:
          побудова φ: χ→F, θ: F→χ′
                де φ = h(Wχ + b) і θ = g(W′φ + b′)
          обчислення втрати L = ‖χ − χ′‖²
    Until argmin_{φ,θ} ‖χ − (φ·θ)χ‖² => досягнення мінімуму помилки RE
    Обчислення порогу за формулою (2)
    Pruning
    Обчислення w′ = argmin_w ‖χ − χ′‖² + λ Σ_{i=0}^{k} |w_i| => L1 нормалізація
    If ваги набули значення нуль, then обрізати ваги
    Перенавчити модель
    Застосовувати кластеризацію зі збереженням розрідженості
    For кожного шару do
          Сформувати групу вагів у 8 кластерів
          Оновити ваги на основі їх кластерних центроїдів
    end for
    Квантизувати параметри і функції активації до float16 і unit8
end procedure
```

7.2 Аналіз результатів експериментів

Розглянемо результати навчання моделі для вилучення ознак та оцінку продуктивності автокодера та порівнюємо його з іншими оптимізованими автокодерами.

Виділення ознак. Спочатку були навчені чотири різні нормальні набори даних IoT за допомогою автокодера: (a) ThingSpeak-LED, (b) MQTT-Temp, (c) Amazon Alexa, (d) Wipro-Bulb. Далі до навченої моделі був застосований набір даних для реконструкції як нормального, так і аномального трафіку. Були розраховані значення RE, використовуючи формулу (1) для середньої абсолютної помилки і формулу (2) для середньої квадратичної помилки [1,8,9]:

$$MAE_{RE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\|\chi - \chi'\|^2, \quad (1)$$

$$MSE_{RE} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\|\chi - \chi'\|, \quad (2)$$

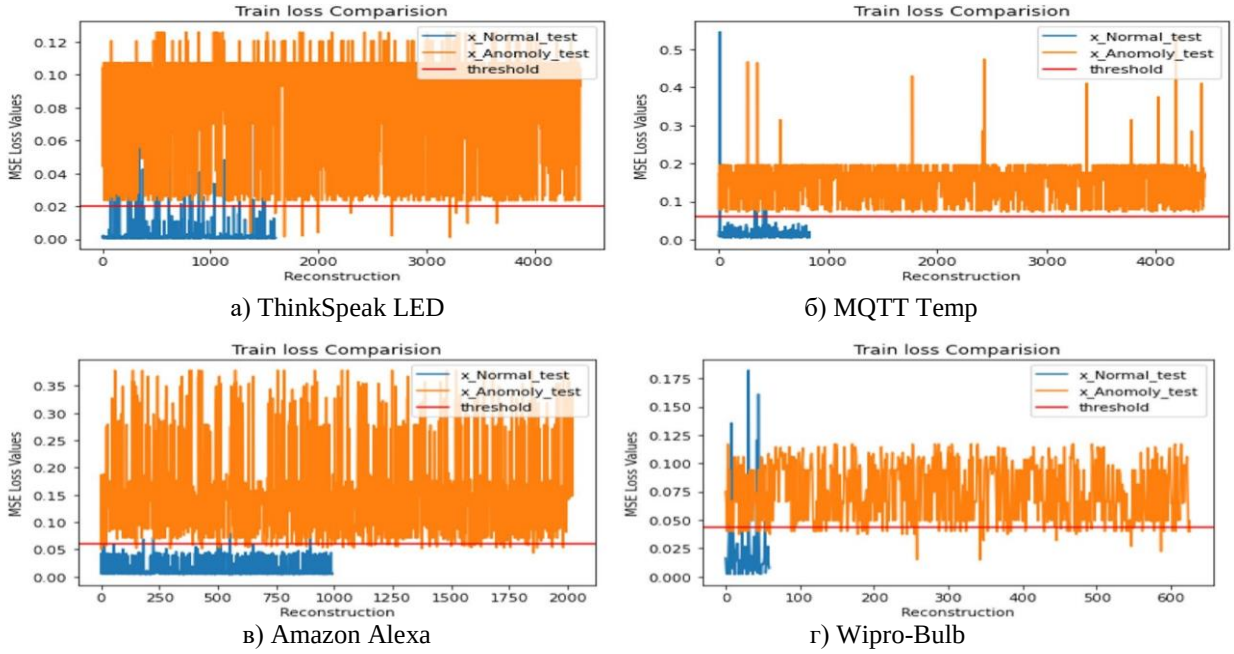
де n – кількість записів у даних. Згідно з моделлю автокодера, якщо модель навчена тільки для нормального трафіку, вона повинна генерувати високе значення RE для аномального трафіку під час прогнозування.

За допомогою похибки реконструкції, можна розрахувати поріг для розрізнення нормального та аномального трафіку за формулою (3):

$$threshold = \mu(RENormal)+\sigma(RENormal), \quad (3)$$

де μ – середнє значення, σ – стандартне відхилення, RENormal – RE нормального трафіку.

На рис. 3 [1,10,11] показано графічне представлення різниці нормального та аномального трафіку за допомогою порогового значення, розрахованого на основі помилки реконструкції після декодування нормального датасету.



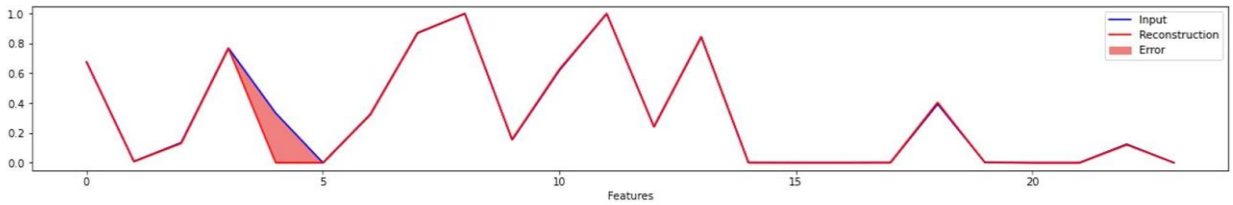
а) ThinkSpeak LED б) MQTT Temp

в) Amazon Alexa г) Wipro-Bulb

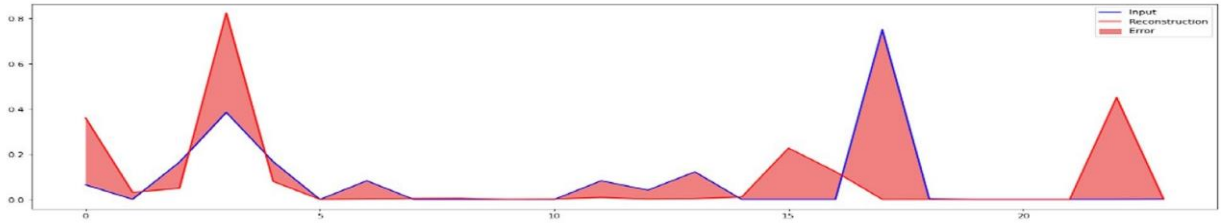
Рис. 3. Вимірювання порогу аномалії для різних нормальних наборів даних
Fig. 3. Measuring the anomaly threshold for different normal data sets

Далі були об'єднані всі сліди нормального мережевого трафіку з різних пристроїв IoT, щоб сформувати остаточний набір даних RT-IoT. Цей остаточний набір даних містить ознаки з високим RE лише для того, щоб зменшити обчислювальну складність. У [1] показано вилучені ознаки з кожного набору даних для виявлення мережевих аномалій.

Проведено навчання на RT-IoT за допомогою автокодера та перераховані RE для нормального та аномального трафіку (рис. 4, 5).



а)



б)

Рис. 4. Похибка реконструкції RT-IoT:а – без атак; б – з атаками
Fig. 4. Reconstruction error RT-IoT: a - without attacks; б – with attacks

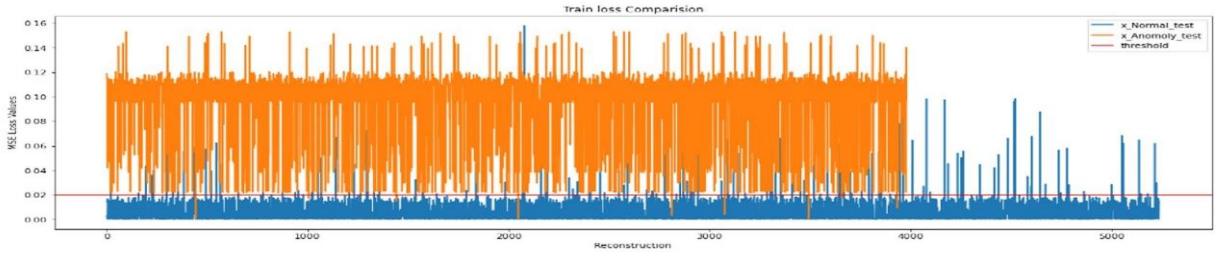


Рис. 5. Поріг RT-IoT
Fig. 5. RT-IoT threshold

Рис. 4a і b ілюструє правильність RE шляхом побудови графіків для всіх вилучених ознак. З рисунку видно, що RE є високим для аномального трафіку у всіх наборах даних порівняно з нормальним трафіком. Нарешті, був розрахований поріг для виявлення аномального трафіку за формулою (3). На рис. 5 показано генерацію помилок у нормальному та аномальному трафіку і також пороговий рівень для розрізнення аномалій [1,12,13].

7.3 Оцінка ефективності моделі

Спочатку був розглянутий лише нормальний трафік, щоб виділити ознаки для виявлення аномалій. Потім всі ознаки були об’єднані у запропонований набір даних RT-IoT2022, щоб оцінити продуктивність. Було досліджено такі метрики оцінки ефективності, як точність (accuracy), презицийність (precision), відгук (recall) і оцінка F1, щоб перевірити запропоновану навчальну модель. Показник точності вимірює частку правильно передбаченого нормального або аномального трафіку. Через рекомендацію не покладатися лише на точність, коли існує дисбаланс у кількості випадків між класами, також розглянуто метрику прецизійності. Precision вимірює частку точно передбачених хибних спрацьовувань. Чутливість, або відгук, моделі на реальну ситуацію, або істинність, показує частку передбачених правильних відповідей серед усіх правильних відповідей. Показник F1 обчислює середнє гармонійне значення точності та пригадування, щоб краще зрозуміти результати в незбалансованому наборі даних.

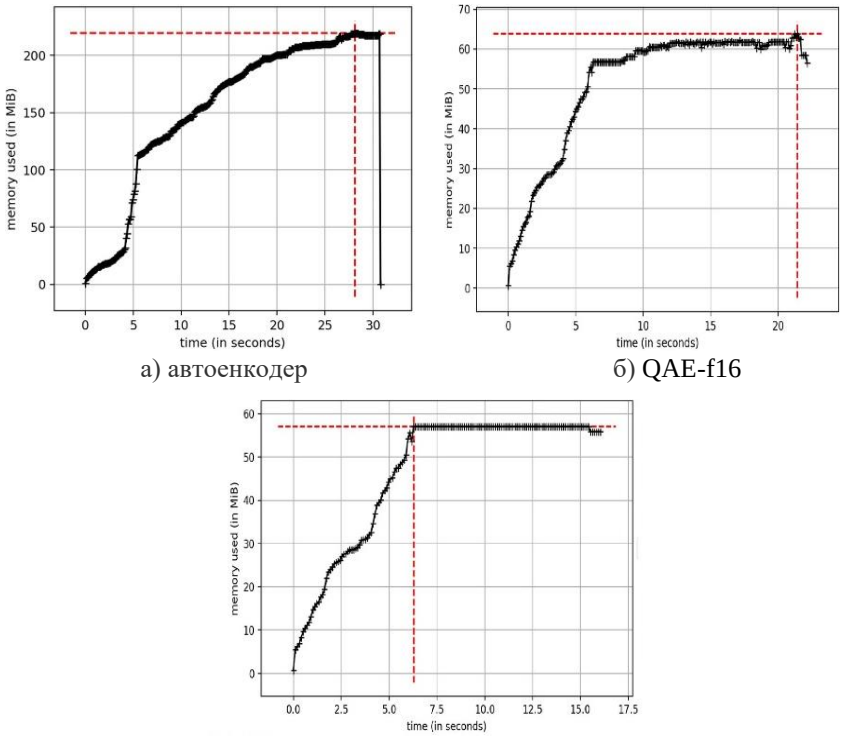
За результати було виявлено, що значення точності для кожного окремого IoT пристрою склало не менше 91,5%, найвище значення досягнуто для MQTT сенсорів. Середнє значення показника F1 склало 98%, що говорить про високу ефективність запропонованої моделі.

8 Результати та обговорення

Побудовані моделі були протестовані на сучасних пристроях Raspberry Pi. Конфігурація пристрою IoT з обмеженими ресурсами – 2 ГБ оперативної пам'яті та чотирьохядерний 64-розрядний процесор ARM Cortex-A53 з тактовою частотою 1,2 ГГц. Інструменти штучного інтелекту, задіяні в даній роботі, – це TensorFlow-1.2 та пакет підтримки tflite. На пристрої

Raspberry Pi були перевірені істинні значення часових витрат, завантаження процесора та пам'яті для автокодерів QAE-f16 та QAE-u8.

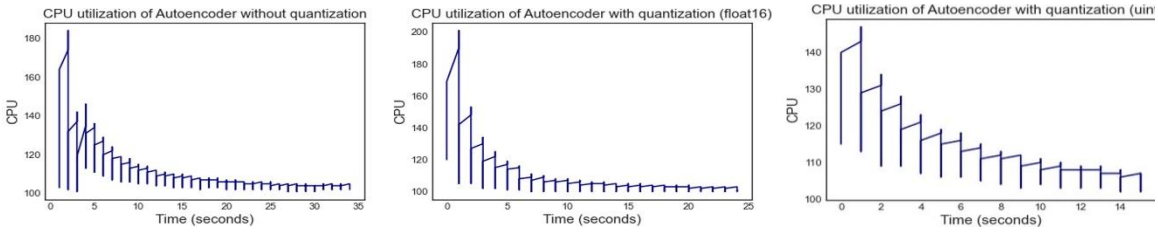
На рис. 6 і 7 показано споживання пам'яті та завантаження процесора на пристроях з обмеженими ресурсами [1,14,15].



а) автоенкодер б) QAE-f16

в) QAE-u8

Рис. 6. Використання пам'яті автокодера, моделі QAE-f16, QAE-u8
Fig. 6. Using the memory of the auto-encoder, models QAE-f16, QAE-u8



а) автоенкодер б) QAE-f16 в) QAE-u8

Рис. 7. Завантаження процесора автокодера, моделей QAE-f16, QAE-u8
Fig. 7. Processor load of the autocoder, models QAE-f16, QAE-u8

У [1] наведено повний аналіз усіх трьох запропонованих моделей. Узагальнення результатів, що стосуються всіх трьох запропонованих моделей.

Результати показують, що модель автокодера QAE-u8 споживає менше пам'яті та процесора. Таким чином, з наведеного вище обговорення можна вивести, що QAE-u8 має перевагу в умовах обмежених ресурсів. На рис. 8 показано графіки чисельних результатів.

Запропонована модель QAE не лише забезпечує переваги у продуктивності, але й підвищує енергоефективність за рахунок зменшення витрат на пам'ять для зберігання даних та підвищення ефективності обчислень. Це суттєво сприяє широкому впровадженню IDS на основі QAE-u8 у сільському господарстві та медичних пристроях IoT, оскільки ці пристрої потребують недорогих в обчислювальному плані технологій штучного інтелекту.

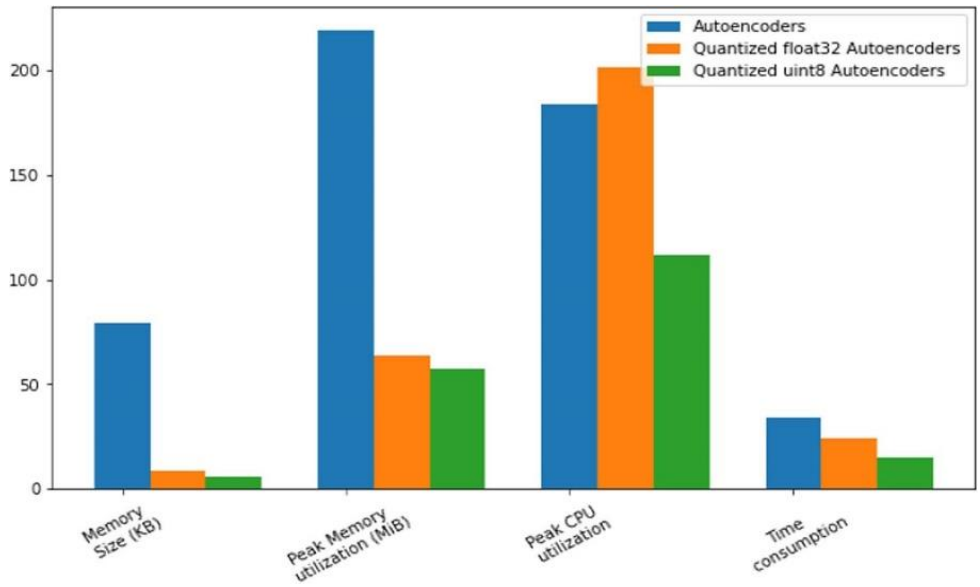


Рис. 8. Використання процесора автокодера, моделей QAE-f16 та QAE-u8
Fig. 8. Use of the autocoder processor, models QAE-f16 and QAE-u8

9 Висновки

У дослідженні розглянуло створення набору даних RT-IoT з використанням середовища IoT, яке виявляє аномалії за допомогою моделі автокодера. Набір даних включає Amazon Alexa, ThingSpeak-LED, MQTT-Temp, WiproBulb, мережевий трафік SSH та DDoS. Модель автокодера розраховує RE та порогові значення для виявлення аномалій в інфраструктурі IoT. Однак, основним недоліком побудови IDS на основі автокодерів в пристроях IoT є те, що вони обмежені в ресурсах, зокрема, в пам'яті, обчислювальній здатності та потужності. Тому в цьому дослідженні було запропоновано дві оптимізовані моделі автокодерів, QAE-u8 та QAEf16, для побудови фреймворку IDS. Оптимізація моделей автокодерів включає в себе методи обрізання, кластеризації та квантування. Проведено фінальне прогнозування моделі на пристрої Raspberry Pi, де спостереження за QAE-u8 показали, що розмір пам'яті стиснувся до 92,23%, а використання пам'яті зменшилося до 70,01%. Пікове завантаження процесора знизилося до 27,94%. Крім того, спостерігається значне зменшення часу, що витрачається на прогнозування, з 35 до 15 секунд. Результати показують, що запропонована модель QAEu8 може перевершити оригінальну модель автокодера в контексті зменшення обсягу пам'яті, процесора та використання пам'яті. Отже, вона підходить для пристроїв IoT з обмеженими ресурсами. Також проаналізована точність, ефективність, запам'ятовування та показник F1 для всіх трьох моделей. Результати показують, що QAE-u8 з MAE досягнув багатообіцяючих показників за метриками оцінювання порівняно з моделлю QAE-f16, але дещо нижчих показників порівняно з базовою моделлю автокодера. Таким чином, можна зробити висновок, що існує компроміс між автокодером і моделлю QAE-u8 в контексті точності та параметрів оцінки процесора, таких як пам'ять і центральний процесор.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sharmila, B.S., Nagapadma, R. Quantized autoencoder (QAE) intrusion detection system for anomaly detection in resource-constrained IoT devices using RT-IoT2022 dataset. *Cybersecurity* , 2023. 6, 41. https://doi.org/10.1186/s42400-023-00178-5
2. Рубан І. В., Мартовицький В. О., Партика С. О. Класифікація методів виявлення аномалій в інформаційних системах. *Системи озброєння і військова техніка*, 2016. №. 3. С. 100-105. https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/7c434471-942c-40a7-b70c-0cc2655a42fe/content
3. Gavrylenko , S., Poltoratskyi , V., & Nechyporenko , A. Intrusion detection model based on improved transformer (Модель виявлення вторгнень на основі покращеного трансформатора). *Advanced Information Systems*, 2024. 8(1), С. 94–99. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.1.12 http://ais.khpi.edu.ua/article/view/299010

4. Зац, О., Стрілець, В., Шматков, С., Ющенко, В. Віртуалізація мереж – підхід до оптимізації комп'ютерних мереж. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*, 2024. Вип. 61, С. 33-43. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2024-61-04
5. Мірошник М., Корольова Я., Деменкова С., Шафранський А. Моделі діагностування інтерактивних комп'ютерних мереж на структурно-логічному рівні. *Вісник Національного технічного університету" ХПІ". Серія: Інформатика і моделювання*. 2024., 1-2 (11-12). – с. 96-104. http://pim.khpi.edu.ua/article/view/308453 https://doi.org/10.20998/2411-0558.2024.01.08
6. Пахомов Ю.В., Корольова Я. Ю., Демченко К. В., Деменкова С.Д. Використання метода пошуку аномалій для виявлення мережевих атак. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н.Каразіна, сер. «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*. 2023. вип. 59. С.35-48. https://periodicals.karazin.ua/mia/article/view/23836 https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-60-02
7. Лобойченко Д.А. Мірошник М.А. , Шкіль О.С. , Рахліс Д.Ю., Мірошник А.М. Методи побудови тестів для інтерактивних комп'ютерних мереж на структурно-логічному рівні. *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Інформатика та моделювання*. 2023. № 1 – 2 (9 – 10). с. 81-92 (137 с.). DOI: https://doi.org/10.20998/2411-0558.2023.01.07
8. Коробейнікова Т.І., Цар О.О. Аналіз сучасних відкритих систем виявлення та запобігання вторгнень. *Національний університет «Львівська політехніка»*, Україна. May 2023, *Грааль науки*. С.317-325. DOI:10.36074/grail-of-science.12.05.2023.050, License, CC BY-SA 4.0
9. Гавриленко С.Ю., Зозуля В.В. Дослідження методів виявлення аномалій на етапі попередньої обробки даних. *Системи управління, навігації та зв'язку,* 2022, випуск 1(67), С. 52-56. doi: 10.26906/SUNZ.2022.1.052
10. Lykhach O., Ugryumov M., Shevchenko D., & Shmatkov S. Anomaly detection methods in sample datasets when managing processes in systems by the state. *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series «Mathematical Modeling. Information Technology. Automated Control Systems»*, 2022, 53, 21-40. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2022-53-03
11. Стрілець В.Є., Дорошенко М.І. Аналіз і прогнозування характеристик комп'ютерної мережі. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна. Серія «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»*, 2022. Вип. 55. С. 49 – 57. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2022-55
12. Лук'яненко Т. Ю., Поночовний П.М., Легомінова С.В. Методика виявлення мережевих вторгнень і ознак комп'ютерних атак на основі емпіричного підходу. *Сучасний захист інформації*. № 2 (2022). С.15-21. https://doi.org/10.31673/2409-7292.2022.021521
13. Панченко М.В., Біглан А.М., Бабенко Т.В., Тимофєєв Д.С. Виявлення аномалій інформаційної безпеки на основі аналізу ентропії інформаційної системи. *Енергетика і автоматика*, 2022. №1. https://doi.org/10.31548/energiya
14. Нічепорук А.О., Нічепорук А.А., Савенко О.С., Казанцев А.Д. Інтелектуальна система виявлення аномалій та ідентифікації пристроїв розумних будинків із застосуванням колективної комунікації. *Хмельницький національний університет. Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2021. № 34 (110).
15. Мєшков В., Віролайнен В. Аналіз сучасних систем виявлення та запобігання вторгнень в інформаційно-телекомунікаційних системах. *Проблеми безпеки інформації в інформаційно-комунікаційних системах*. 2015. С. 1-4. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/17609

REFERENCES

1. Sharmila, B.S., Nagapadma, R. Quantized autoencoder (QAE) intrusion detection system for anomaly detection in resource-constrained IoT devices using RT-IoT2022 dataset. Cybersecurity 6, 41 (2023). https://doi.org/10.1186/s42400-023-00178-5

2. Ruban I. V., Martovytskyi V. O., Partika S. O. Classification of anomaly detection methods in information systems. *Armament systems and military equipment*. 2016. no. 3. pp. 100-105. https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/7c434471-942c-40a7-b70c-0cc2655a42fe/content [in Ukrainian].

3. Gavrylenko , S., Poltoratskyi , V., & Nechyporenko , A. Intrusion detection model based on improved transformer. *Advanced Information Systems*, 2024, 8(1), P. 94–99. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2024.1.12 http://ais.khpi.edu.ua/article/view/299010

4. Zats, O., Strilets, V., Shmatkov, S., Yushchenko, V. Virtualization of networks – an approach to optimization of computer networks. *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series 'Mathematical modelling. Information technologies. Automated control systems'*, 2024. Issue 61, pp. 33-43. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2024-61-04 [in Ukrainian]

5. Miroshnyk M., Koroliova Ya., Demenkova S., Shafransky A. Models of diagnosing interactive computer networks at the structural and logical level. Series: Informatics and modelling. *Bulletin of the National Technical University 'KhPI'. Series: Informatics and modelling*. 2024., 1-2 (11-12). P. 96-104. [in Ukrainian]

http://pim.khpi.edu.ua/article/view/308453 https://doi.org/10.20998/2411-0558.2024.01.08

6. Pakhomov Yu.V., Koroliova Ya.Yu., Demchenko K.V., Demenkova S.D. Using the method of anomaly search for detecting network attacks. *V. N. Karazin Kharkiv National University Bulletin, series 'Mathematical modelling. Information technologies. Automated control systems'*. 2023. issue. 59. P.35-48. [in Ukrainian] https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-60-02

7. Miroshnyk M. A., Shkil O.S., Rakhlis D.Yu., Miroshnyk A.M., Loboichenko D.A. Methods of building tests for interactive computer networks at the structural and logical level. *Bulletin of the National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'. Collection of scientific papers. Series: Informatics and modelling*. 2023. № 1 – 2 (9 – 10). P. 81-92 (137c.). https://doi.org/10.20998/2411-0558.2023.01.07 [in Ukrainian].

8. Korobeynikova T.I., Tsar O.O. Analysis of modern open intrusion detection and prevention systems. *Lviv Polytechnic National University*, Ukraine. May 2023, *the grail of science*. pp. 317-325. https://doi.org/10.36074/grail-of-science.12.05.2023.050, License, CC BY-SA 4.0 [in Ukrainian]

9. Gavrylenko S., Zozulia V. nvestigation of methods for detecting anomalies at the stage of data pre-processing. *Control, Navigation and Communication Systems*. 2022, Issue 1(67), P. 52-56. [in Ukrainian]. https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.1.052

10. Lykhach O., Ugryumov M., Shevchenko D., & Shmatkov S. Anomaly detection methods in sample datasets when managing processes in systems by the state. *Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, Series «Mathematical Modeling. Information Technology. Automated Control Systems»*, 2022, 53, 21-40. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2022-53-03 [in Ukrainian].

11. Strilets V.Ye., Doroshenko M.I. Analysis and forecasting of computer network characteristics/ *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University. Series 'Mathematical modelling. Information technologies. Automated control systems'*, 2022. Issue 55. P. 49 – 57. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2022-55 [in Ukrainian].

12. Lukyanenko T. Yu., Ponochevny P. M., Legominova S. V. Methodology for detecting network intrusions and signs of computer attacks based on an empirical approach. *Modern protection of information*. 2022. No. 2. P. 15-21.DOI: 10.31673/2409-7292.2022.021521 [in Ukrainian].

13. Panchenko M.V., Bigdan A. M., Babenko T. V., Timofeev D. S. Identification of information security anomalies based on information system entropy analysis. *Energy and automation*, No. 1, 2022. DOI 10.31548/energiya [in Ukrainian].

14. Nicheporuk A.O., Nicheporuk A.A., Savenko O.S., Kazantsev A.D. An intelligent system for detecting anomalies and identifying devices of smart buildings using collective communication. Khmelnytskyi National University // ISSN 2221-3805. *Electrical and computer systems*. 2021. No. 34 (110) Information systems and technologies Users/Administrator/Downloads/3196-Article Text-2350-1-10-20210904.pdf [in Ukrainian].

15. Meshkov V., Virolainen V. Analysis of modern systems for detecting and preventing intrusions in information and telecommunication systems. *Problems of information security in information and communication systems*. 2015. P. 1-4. https://ela.kpi.ua/handle/123456789/17609 [in Ukrainian].

Miroshnyk Maryna *Doctor of Technical Sciences, Professor,*
Professor of Computer systems and robotics department,
Institute of Computer Science and Artificial Intelligence,
V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 6, Kharkiv, Ukraine, 61022

Shmatkov Sergiy *Doctor of Technical Sciences, Professor,*
Professor of Computer systems and robotics department,
Institute of Computer Science and Artificial Intelligence,
V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 6, Kharkiv, Ukraine, 61022

Strilets Viktoriia *Candidate of Technical Sciences, associate professor of Computer systems and robotics department, Institute of Computer Science and Artificial Intelligence,*
V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 6, Kharkiv, Ukraine, 61022

Zats Oleksandr *postgraduate student of Institute of Computer Science and Artificial Intelligence,*
V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq., 6, Kharkiv, Ukraine, 61022

Investigation of computer systems to detect intrusions and network anomalies

The article describes models of intrusion and network anomaly detection systems with quantum autocoding in computer systems. The paper proposes innovative methods for researching intrusion and network anomaly detection systems with quantum autocoding in computer systems that can provide fast response and a high level of adaptability. The paper proposes a quantum QAE (Quantised Autoencoder) model is used in intrusion detection systems to identify anomalies. This model is an optimization approach based on autoencoders, which integrates techniques such as cut-off, clustering, and integer quantisation.

Relevance. The significance of this work lies in the ability to investigate intrusion and network anomaly detection systems utilizing quantum autoencoding in information and communication systems. The study focuses on creating a method for detecting anomalous attacks in IoT network traffic, as identifying anomalies requires detailed monitoring of various network activities. Moreover, the network traffic of each IoT device is distinct. Consequently, the study applies an autoencoder algorithm for anomaly detection, using benign network traffic for model training, with the assumption that any anomalous traffic would lead to an anomaly reconstruction (AR) error.

Research methods. methods for studying intrusion detection systems and network anomalies with quantum autocoding in information and communication systems are probabilistic, verification modelling, and the use of cloud computing, which provide flexibility, scalability and resources for building effective computer attack detection systems.

The results. A real-time IoT dataset was created for both normal and attack traffic. During the training phase, the autoencoder model is trained on normal traffic. The same model is then used to reconstruct anomalous traffic, with the expectation that the reconstruction error (RE) for anomalies will be significant, aiding in the detection of attacks. Additionally, the performance of the autoencoder model was evaluated using metrics such as precision, accuracy, recall, and through a comprehensive experimental study.

Conclusions. The results show that there is a trade-off between the autoencoder and the QAE-u8 model in terms of accuracy and processor evaluation parameters such as memory and CPU. Thus, we conclude that there is a trade-off between the autoencoder and the QAE-u8 model in terms of accuracy and processor evaluation parameters such as memory and CPU. In future research, we will focus on other IoT device vulnerabilities to develop a more secure IoT infrastructure.

The scientific novelty of this work is the development of strategies and techniques for identifying anomalous attacks in IoT network traffic.

Keywords: *computer system, intrusion detection systems, network anomaly detection systems, quantum autocoding*.

Надійшла у першій редакції 04.02.2025, в останній - 06.03.2025.
The first version has been received on 04.03.2025, the final version – on 06.03.2025.

DOI: https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-07

УДК (UDC) 004.8

Omelchenko Ihor Valeriiovych
PhD student, Department of Mathematical Modeling and Data Analysis
Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq 4, Kharkiv, Ukraine, 61022
e-mail: ihor.v.omelchenko@gmail.com;
https://orcid.org/0009-0007-4474-4916

Strukov Volodymyr Mykhailovych
PhD in Technical Sciences, Associate Professor; Head of the Department of Mathematical Modeling and Data Analysis
Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq 4, Kharkiv, Ukraine, 61022
e-mail: volodymyr.strukov@karazin.ua;
http://orcid.org/0000-0003-4722-3159

On the impact of prompts on agent performance in a virtual environment

Relevance: Currently, it is promising to study the application of language models in decision-making tasks. It is possible to use pre-trained language models that demonstrate skills in working with arbitrary text, solving logical tasks, and are able to learn from text examples. Such language models are able to solve new tasks that are presented in text form.

Goal: The goal is to conduct a study of the influence of various language instructions (prompts) on the functioning of an agent in a virtual environment. The agent functions on the basis of a pre-trained language model.

Research methods: To perform the study, a Minigrid virtual environment and pre-trained language models were used, a software agent was created based on the language model, a set of language instructions was created using such methods as zero-shot learning, few-shot learning, and others. The effectiveness of the agent's functioning is estimated using the following numerical values: total reward in the environment, episode duration, number of language model calls. Experiments were conducted to train and test a software agent in a virtual environment. Numerical and statistical results of experiments were collected.

Results: Differences in the functioning of the agent were revealed when using different methods of designing language instructions. Language instructions that contain examples of solving tasks lead to better results than those that present the task in imperative form. An improvement in agent performance was also demonstrated upon the addition of a default action plan. Adding episodic memory into the agent further enhanced performance in specific cases.

Conclusions: In this work, we considered a software agent based on a pre-trained language model that solves the decision-making problem in a virtual environment.

Keywords: *machine learning, deep learning, artificial neural network, language model, prompt, decision-making, reinforcement learning, PPO, agent, virtual environment, minigrid.*

How to quote: I. Omelchenko, and V. Strukov, “On the impact of prompts on agent performance in a virtual environment”, *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 65, pp. 83-91, 2025. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-07

Як цитувати: . Omelchenko I., Strukov V. On the impact of prompts on agent performance in a virtual environment. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2025. вип. 65. С.83-91.
https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-07

1. Вступ

In recent years, the scientific community has been particularly interested in language models (LM) [1]. Such models are organized as deep neural networks that solve the problem of determining the next token (word fragment) in a text sequence. When trained on large and high-quality text data, language models demonstrate the ability to process arbitrary texts, understand different languages and solve logical and mathematical problems. Such abilities can be used to solve the problem of decision-making in the environment [2].

The decision-making problem can be represented as a hierarchy of actions [3], where higher levels consist of a sequence of lower-level actions. Such high-level actions can be considered as an agent's plan of actions.

© Omelchenko I., Strukov V., 2025
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

In recent works [4], the possibilities of integrating language models into software agents were considered. The influence of the structure of language instructions on the quality of agent functioning is not completely explored.

These works consider agents that have a three-component structure that includes a high-level planner, an execution module and a data representation adapter [5]. This structure allows the system to be used in different environments and reduces the number of necessary modifications. At the same time, the language model remains unchanged, while one changes the language instructions that are specific to a particular environment and task.

Language models are able to analyze data received as a feedback from the environment in response to actions selected by the language model [6]. Language models are able to generate an internal monologue that improves the quality of task performance. This system was applied to solving tasks of moving objects by a robotic system in a physical environment in response to a user request.

In this work, we investigate the influence of language instructions on the quality of agent performance values. We start with the results of the work [4], which we are planning to improve by considering various language instructions. In this work we use a two-dimensional discrete virtual environment and a software agent that is able to perform actions in the environment. A set of approaches to creating language instructions is investigated, such as zero-shot and few-shot in-context learning supplemented with default plan and memory.

2. Problem formulation

2.1 Agent

In the study, we use a software agent similar to one in [4], which consists of three components: Planner, Mediator, Actor. The Planner component includes a pre-trained language model and performs the task of generating a plan of abstract actions based on the observation of the state of the environment. This component accepts data as input and returns data in a text representation as output. The Mediator component is used to convert data between a text representation and a representation specific to observations and actions of the environment. Abstract actions generated by the Planner component are passed to the input of the Actor component, which converts abstract actions into a sequence of specific actions that will be performed in the environment. In addition, the Actor decides when the plan is completed or when it is necessary to call the Planner and generate a new action plan.

During the training of the agent, we optimize the Actor component which decides when it is necessary to generate a new plan. At the same time, the language model, which is part of the Planner component, remains unchanged.

2.2 Environment

In this work, we use the Minigrid virtual environment. This environment provides a set of instruments for creating specific tasks that include navigating two-dimensional mazes and interacting with objects in the maze. Our study uses a modified version of the Minigrid environment, which limits the area visible to the agent, so that the agent needs to explore the environment at first to learn about its structure and objects in the environment.

The environment usually contains walls that restrict the agent's movement, doors that can be closed, limiting visibility and requiring the use of a key to open them, boxes that can contain other objects, circles that serve as obstacles which the agent can move by itself. The objects are distinguished by color, which adds variability to the task formulation and adds combinatorial complexity to the space of possible solutions.

To simplify the task we consider the environment without obstacles. So, the task is to find the key and open the door in the smallest possible number of steps. Some examples of this environment are given in Fig. 1.

The agent interacts with the environment during episodes. At the beginning of an episode, the environment is initialized with a specific task and the agent is placed in a random location in the maze. Then, the agent can perform a sequence of actions that can lead to the successful completion of the task or to reaching the step limit, which is 100 steps, after which the episode is considered complete.

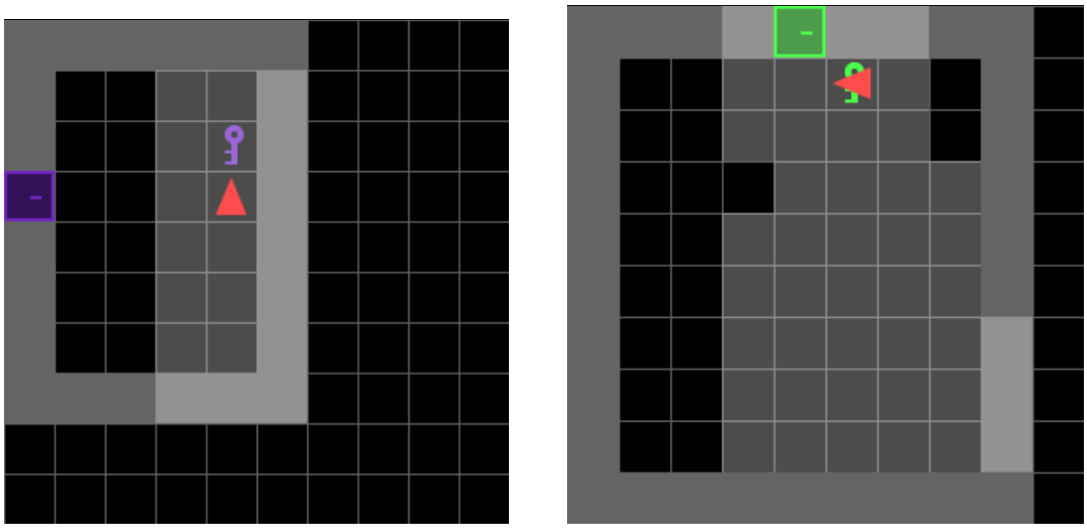


Figure 1: Examples of the environment
Рисунок 1: Приклади оточення

3. Prompts

Modern prompt creation techniques such as zero-shot and few-shot prompt [7] were used to test the agent. Basic versions of prompts that are capable of creating only one action instead of a sequence of actions were also tested. In addition, memory for one episode was tested.

The zero-shot prompt technique consists in passing the task description to the language model without examples of solutions. Instead, the few-shot prompt technique includes a set of examples of correct task solutions, so that in this case, the language model generalizes the examples and applies a general scheme for solving the task.

The default plan prompt was tested, in which case the model received an example of solving the task, which with a small number of modifications could be transformed into a solution for a specific situation.

Memory lasting one episode was also used. With memory turned off, the agent receives only observations of the current state of the environment. In this case, the agent does not take into account its own previous mistakes and cannot learn from its own experience of interacting with the environment. In the case of memory presence, the agent receives a history of interactions with the environment from the beginning of the current episode.

4. Training

During the agent training, one of the agent's neural networks was optimized. This neural network functions as the communication policy. This component decides when to generate a new action plan, which leads to the language model call. The language model execution requires significant computing power and takes a significant amount of time compared to other elements of the system, so reducing the number of language model calls leads to a decrease in the average duration of one iteration. The communication policy was trained using the Proximal Policy Optimization (PPO) reinforcement learning method [8]. As a result of training, the communication policy called the language model only in cases when it was necessary to generate a new plan. At the same time, the pre-trained language model remained unchanged, it was not fine-tuned.

Training lasted for 1000 iterations, where each iteration corresponded to one episode of the interaction with the environment. From the Fig. 2 we see that the average reward during the episode increased to an average value of 0.6 as training progressed. The Fig. 3 shows the duration of the training episodes. We note that an episode cannot last more than 100 iterations, so after 100 iterations in one episode the agent is considered to have failed the task. From this figure, we see that the average value fluctuates around an episode duration of 30 steps, which indicates that the agent is able to successfully complete the task in most cases in less than 100 iterations. The Fig. 4 shows the average number of language model calls for each episode during training. From this figure, we can see that the number of language model calls drops rapidly and reaches a value of 3 calls per episode by the end of training.

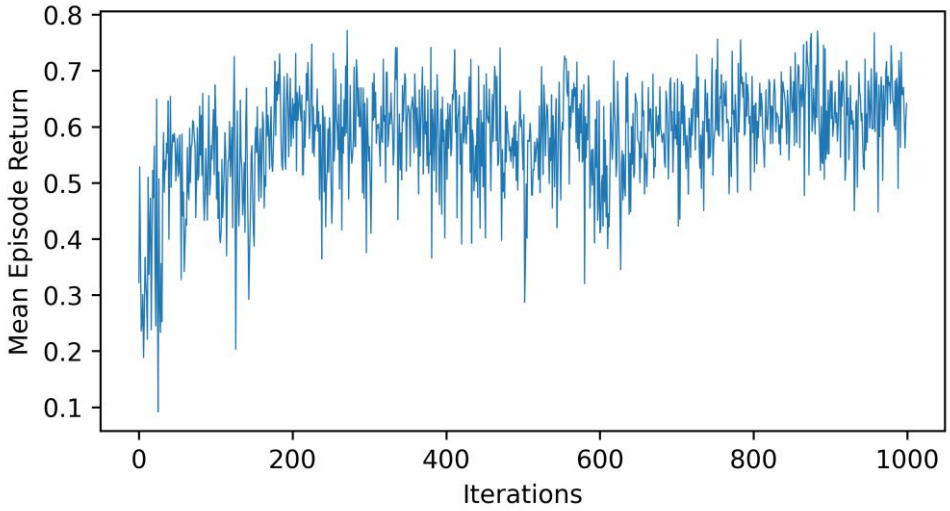


Figure 2: The dependence of mean episode return on number of training iterations
Рисунок 2: Залежність середнього результату епізоду від кількості ітерацій навчання

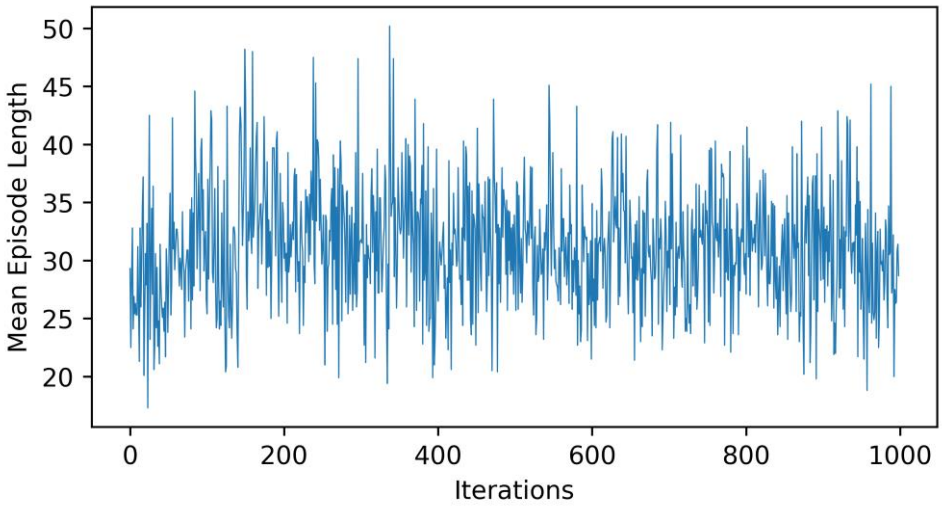


Figure 3: The dependence of mean episode length on number of training iterations
Рисунок 3: Залежність середньої тривалості епізоду від кількості ітерацій навчання

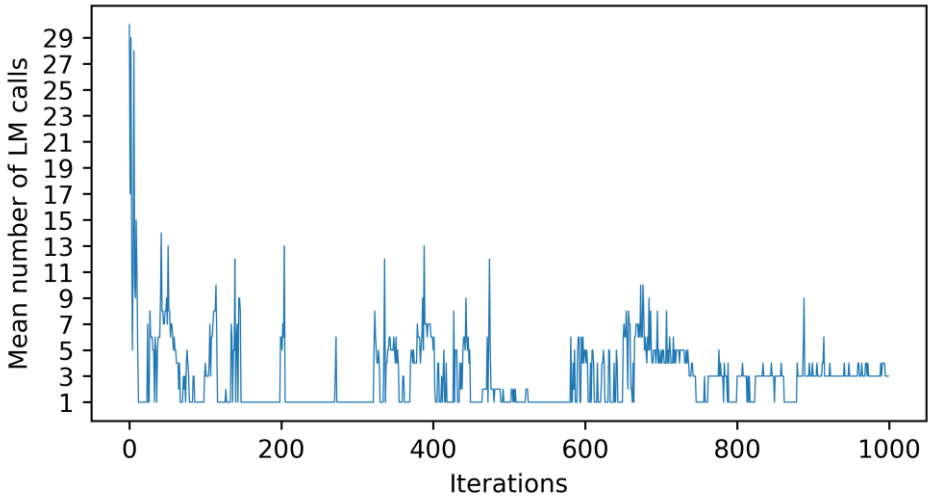


Figure 4: The dependence of mean number of LM calls on number of training iterations
Рисунок 4: Залежність середньої кількості викликів LM від кількості ітерацій навчання

5. Testing

A trained agent was used to test various prompting techniques. Testing was performed on 100 examples of the "Simple Door Key" Minigrid environment, each example of the environment corresponds to a unique random value of initialization seed. During testing, the following metrics were calculated: return, return without communication penalties, number of language model calls, episode duration.

The Fig. 5 shows the quartile return values for different prompts with memory enabled and disabled. From this figure, we see that for the original, few-shot, few-shot default plan prompts, the use of memory does not lead to noticeable improvements. In the case of the "few shot one step" prompt, memory allows the agent to remember the state of the environment between individual iterations, in which the agent can choose only one action. A significant improvement contributed by the memory usage is shown in the case of the "zero shot default plan" prompt, which is explained by the fact that the agent gets access to previous actions in the current episode, which helps to correctly apply the default plan.

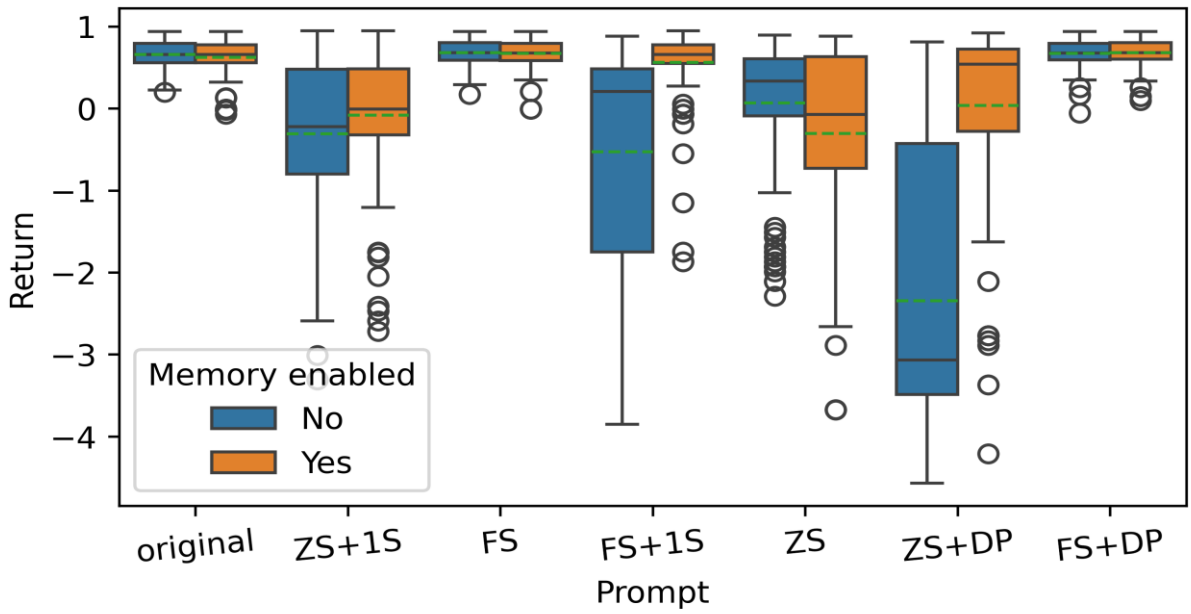


Figure 5. The return value for different prompts depending on memory being enabled or disabled: "original" means prompt from [4], "ZS" is for zero-shot prompting technique, "FS" is for few-shot prompting technique, "1S" is for one-step planning, "DP" is for default plan

Рисунок 5. Результат для різних промптів залежно від увімкнення або вимкнення пам'яті: «original» означає промпт з [4], «ZS» — техніку промптінгу zero-shot, «FS» — техніку промптінгу few-shot, «1S» — однокрокове планування, «DP» — план за замовчуванням.

The Fig. 6 shows the dependence of the penalty for the language model call on the type of prompt and the availability of memory for the agent. A high penalty value corresponds to frequent calls of the language model to rebuild the plan. From the data, we see that the "few-shot one step" prompt without memory often calls the language model, but with the memory enabled, the situation improves significantly. A similar situation is observed in the case of the "zero-shot default plan" and "zero-shot one step" prompts: when memory is enabled, the agent calls the language model less often. In the case of the "zero shot" prompt, enabling memory leads to more frequent language model calls and a higher penalty. In general, we see that prompts of the "few-shot" category receive a significantly lower penalty than "zero-shot" prompts.

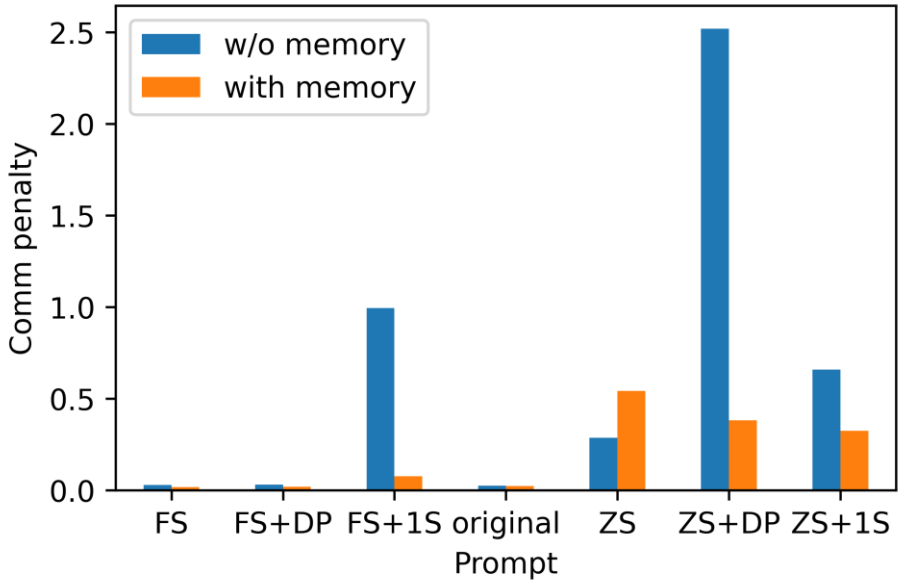


Figure 6. The communication penalty value for different prompts (as in Fig. 5) for memory being enabled or disabled

Рисунок 6. Значення штрафу за комунікацію для різних промптів (як на рис. 5) для пам'яті, що ввімкнена або вимкнена.

The Fig. 7 shows a comparison of the return for different prompts with memory enabled with a percentage improvement compared to the original prompt [4]. Correcting the prompt grammar and adding a default plan gave an improvement of 7.34% and 8.97%, respectively. In the case where the agent could choose only one action at a time, the degradation was -10.5%. Prompts in the zero shot category showed a significant drop in the total reward, up to negative values. These results show that examples of solving the task significantly increase the return received by the agent.

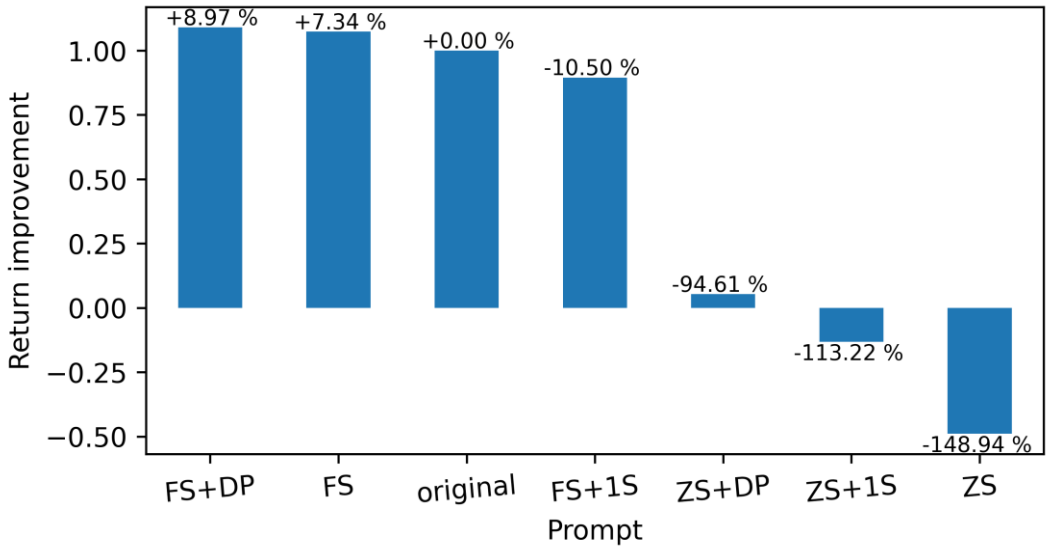


Figure 7. The relative return improvement value comparing to original case from [4] for different prompts (as in Fig. 5)

Рисунок 7. Відносне покращення результату порівняно з початковим випадком з [4] для різних промптів (як на рис. 5)

The average episode duration in Fig. 8 also demonstrates the advantage of few-shot prompts over the original prompt and prompts without examples (zero-shot).

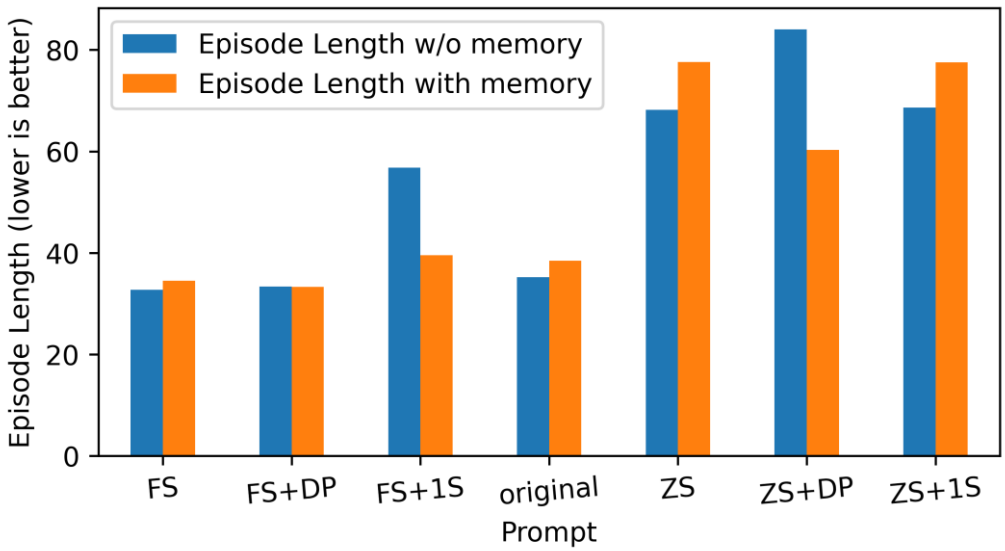


Figure 8. The episode length value for different prompts (as in Fig. 5) for memory being enabled or disabled
Рисунок 8. Значення тривалості епізоду для різних промптів (як на рис. 5) для пам'яті, що ввімкнена або вимкнена.

The Fig. 9 shows the dependence of the number of language model calls on the prompt. In the absence of examples (zero-shot), the agent calls the language model much more often than in cases where the agent has examples available (few-shot).

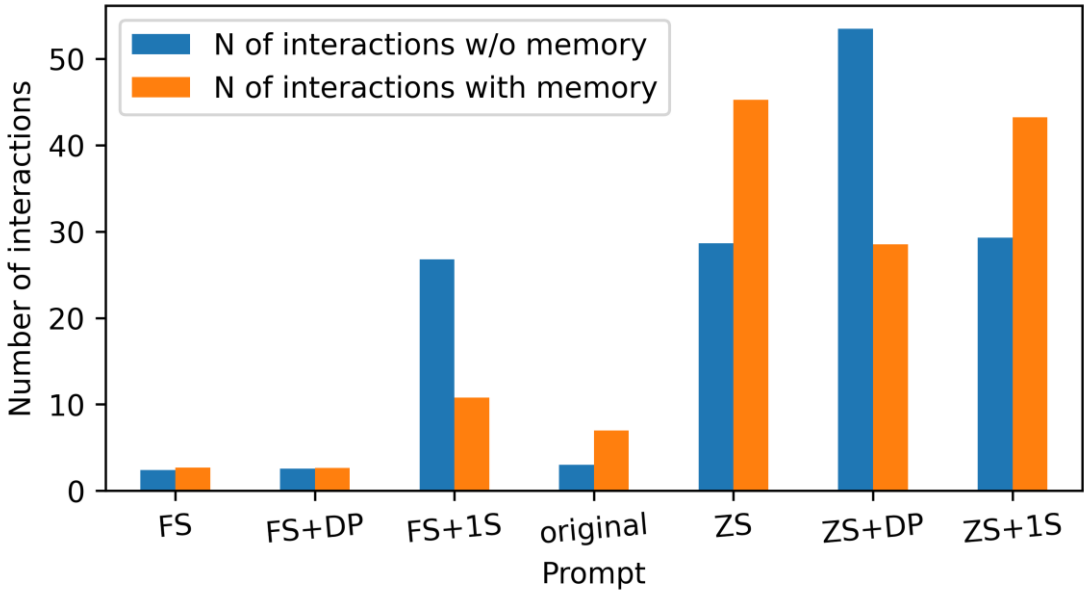


Figure 9. The number of interactions value for different prompts (as in Fig. 5) for memory being enabled or disabled
Рисунок 9. Кількість взаємодій для різних промптів (як на рис. 5) для увімкненої або вимкненої пам'яті

The Fig. 10 shows the dependence of the number of language model calls depending on the prompt, arranged by the increasing number of calls. We can see that the best result was achieved by the agent with the prompt containing examples of solving the task and the default plan.

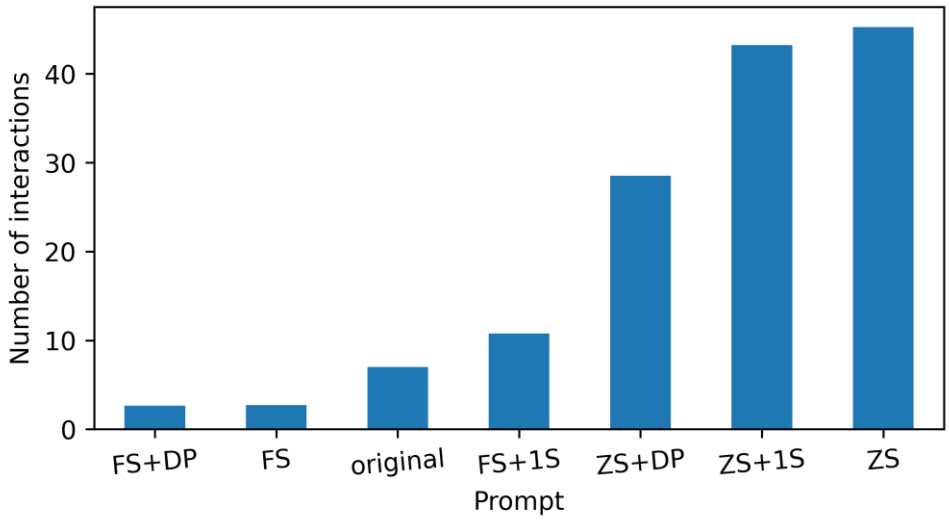


Figure 10. The number of interactions for different prompts (as in Fig. 5) with memory being enabled. The less value corresponds to better result

Рисунок 10. Кількість взаємодій для різних промптів (як на рис. 5) з увімкненою пам'яттю. Менше значення відповідає кращому результату.

6. Conclusions

So, we conducted the research of the agent built on the basis of a language model, which solves the problem of decision-making in the environment. For training and testing, the Minigrid "Simple Door Key" environment was used, which sets the task of navigation in a two-dimensional environment and interaction with objects in it. In this environment, the agent had to find a hidden key and open the door with it. Among the agent components, only the communication policy component was trained, and the language model remained unchanged. As a result of training, the agent reduced the number of language model calls.

The trained agent was tested on 100 instances of the environment. The resulting average metrics demonstrate a significant advantage of prompts with examples (few-shot) over prompts without examples (zero-shot). Some improvement is made by adding a default plan. It is also shown that the agent achieves better results when generating a sequence of actions compared to the situation when the agent can choose only one action at a time. In addition, it can be concluded that it is important how correctly the prompts are written (in a grammatical sense), this is demonstrated by the example of improving the performance of the "few-shot" prompt compared to the "original" prompt.

Therefore, when choosing a technique for creating prompts for agents based on language models, it is worth considering that the presence of examples of solving the task significantly improves the agent's performance. The presence of a default plan has a smaller impact. The presence of memory helps in certain situations, such as when the agent is restricted to choosing only one action at a time. The absence of examples of solving the task and choosing only one action per step can lead to the inability of the agent to complete the task.

In the future, it is of interest to use more complex prompting techniques, use better language models, study the agent's performance in more complex environments, and use agent architectures which allow training both the language model and options at the same time.

REFERENCES

1. A. Vaswani, N. Shazeer, N. Parmar, J. Uszkoreit, L. Jones, A. N. Gomez, L. Kaiser, and I. Polosukhin, "Attention is all you need," 2023. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1706.03762
2. L. Wang, C. Ma, X. Feng, Z. Zhang, H. Yang, J. Zhang, Z. Chen, J. Tang, X. Chen, Y. Lin, W. X. Zhao, Z. Wei, and J. Wen, "A survey on large language model based autonomous agents," Frontiers of Computer Science, vol. 18, no. 6, Mar. 2024. [Online]. Available: http://dx.doi.org/10.1007/s11704-024-40231-1

3. R. S. Sutton, D. Precup, and S. Singh, "Between mdps and semi-mdps: A framework for temporal abstraction in reinforcement learning," Artificial Intelligence, vol. 112, no. 1, pp. 181--211, 1999. [Online]. Available: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0004370299000521
4. B. Hu, C. Zhao, P. Zhang, Z. Zhou, Y. Yang, Z. Xu, and B. Liu, "Enabling intelligent interactions between an agent and an LLM: A reinforcement learning approach," Reinforcement Learning Journal, vol. 3, pp. 1289--1305, 2024. [Online]. Available: https://rlj.cs.umass.edu/2024/papers/RLJ_RLC_2024_161.pdf
5. I. Dasgupta, C. Kaeser-Chen, K. Marino, A. Ahuja, S. Babayan, F. Hill, and R. Fergus, "Collaborating with language models for embodied reasoning," 2023. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2302.00763
6. W. Huang, F. Xia, T. Xiao, H. Chan, J. Liang, P. Florence, A. Zeng, J. Tompson, I. Mordatch, Y. Chebotar, P. Sermanet, N. Brown, T. Jackson, L. Luu, S. Levine, K. Hausman, and B. Ichter, "Inner monologue: Embodied reasoning through planning with language models," 2022. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2207.05608
7. Q. Dong, L. Li, D. Dai, C. Zheng, J. Ma, R. Li, H. Xia, J. Xu, Z. Wu, T. Liu, B. Chang, X. Sun, L. Li, and Z. Sui, "A survey on in-context learning," 2024. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/2301.00234
8. J. Schulman, F. Wolski, P. Dhariwal, A. Radford, and O. Klimov, "Proximal policy optimization algorithms," 2017. [Online]. Available: https://arxiv.org/abs/1707.06347

Омельченко Ігор Валерійович *Аспірант, кафедра математичного моделювання та аналізу даних Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна. Площа Незалежності, 4, Харків, Харківська область, 61022*

Струков Володимир Михайлович *к.т.н., доцент; завідувач кафедри математичного моделювання та аналізу даних Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна. Площа Незалежності, 4, Харків, Харківська область, 61022*

Дослідження впливу мовних інструкцій на якість роботи програмного агента в віртуальному середовищі

Актуальність. Наразі є перспективним дослідження застосування мовних моделей в задачах прийняття рішень. Можливо застосувати попередньо навчені мовні моделі, які демонструють навички роботи з довільним текстом, вирішення логічних завдань та які здатні навчатися з текстових прикладів. Такі мовні моделі здатні вирішувати нові завдання, які представлені у текстовому вигляді.

Мета. Провести дослідження впливу різних мовних інструкцій (англ. prompt) на функціонування агента в віртуальному середовищі. Агент функціонує на основі попередньо-навченої мовної моделі.

Методи дослідження. Для виконання дослідження було використано віртуальне середовище, попередньо навчені мовні моделі, створено програмного агента на основі мовної моделі, створено набір мовних інструкцій з застосуванням таких методів як zero-shot learning, few-shot learning та інших. Ефективність функціонування агента оцінюється за допомогою таких числових величин, сумарна нагорода в середовищі, тривалість епізоду, кількість викликів мовної моделі. Проведено експерименти з навчання та тестування програмного агента у віртуальному середовищі. Зібрано чисельні та статистичні результати експериментів.

Результати. Виявлено відмінність у функціонуванні агента при застосуванні різних методів дизайну мовних інструкцій. Мовні інструкції, які містять приклади вирішення завдань, призводять до кращих результатів, ніж ті, що подають завдання в імперативній формі. Також продемонстровано покращення роботи агента при додаванні плану дій за змовчуванням. Додавання агенту пам'яті, що триває один епізод покращило результати в окремих випадках.

Висновки. В роботі було розглянуто програмного агента на основі попередньо-навченої мовної моделі, який вирішує задачу прийняття рішень в віртуальному середовищі.

Ключові слова: *машинне навчання, глибоке навчання, штучна нейронна мережа, мовна модель, промпт, прийняття рішень, навчання з підкріпленням, PPO, агент, віртуальне середовище, minigrid.*

Надійшла у першій редакції 14.02.2025, в останній - 30.03.2025.
The first version has been received on 14.02.2025, the final version - on 30.03.2025.

DOI: https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-08

УДК (UDC) 004.93:004.94

Рева Сергій Миколайович
к.т.н., доцент кафедри комп'ютерних систем та робототехніки
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи, 4, Харків, Україна, 61022
e-mail: iec-lab@karazin.ua
https://orcid.org/0000-0002-2615-9226

Циблієв Денис Олександрович
аспірант кафедри комп'ютерних систем та роботехніки
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна,
майдан Свободи,4, Харків, Україна, 61022
e-mail:dtsibliev@gmail.com;
https://orcid.org/0009-0008-4373-8773

Комп'ютерне моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією

Актуальність. Комп'ютерні методи аналізу оцифрованих спектрометричних сигналів набули широкого розвитку. Разом з тим, має місце проблема об'єктивного оцінювання ефективності того чи іншого методу цифрової обробки через випадковість процесів на вході детектора випромінювання, яка може бути вирішена за допомогою комп'ютерного моделювання образів сигналів із повністю відомими параметрами. Для більшої відповідності реальним оцифрованим імпульсним сигналам, алгоритми моделювання мають реалізовувати можливість випадкового зміщення часу виникнення і амплітуди імпульсів відносно точок дискретизації.
Метою дослідження є підвищення точності комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів шляхом розробки алгоритмів моделювання зі збільшеною деталізацією цифрового образу сигналу. Додатковим завданням є оцінка максимальної похибки при визначенні параметрів імпульсів простими методами аналізу, що виникає при визначенні амплітуди імпульсів та яка зумовлена самим процесом дискретизації на різних частотах.
Методи дослідження базуються на математичному та комп'ютерному моделюванні, включають в себе чисельні методи та використовують власні розроблені алгоритми. В рамках дослідження розробляється програма, яка здатна генерувати цифрові образи спектрометричних сигналів із заданими параметрами та містить програмно реалізовані методи їх аналізу.
Результати. Було розроблено підхід до моделювання імпульсних сигналів з використанням регульованого коефіцієнту деталізації їх амплітудних та часових параметрів. Використовуючи даний підхід, згенеровано деталізований образ сигналу зі сталою амплітудою імпульсів і випадковим розподілом їх у часі, проведено моделювання процесу його дискретизації при різних тактових частотах. Отримані дані проаналізовано методом Максимуму та визначено максимальні значення похибок при розпізнаванні амплітуд, які зумовлені самим процесом дискретизації.
Висновки. Розроблений алгоритм моделювання дозволяє програмно генерувати цифровий образ сигналу з дискретністю, яка наближує його до реального аналогового сигналу. При цьому точність його відтворення як мінімум на порядок перевищує роздільну здатність сучасних діджітайзерів. Отримані результати досліджень з використанням створених алгоритмів свідчать про те, що для мінімізації похибок, зумовлених дискретизацією, потрібно застосовувати діджітайзери з тактовою частотою понад 1 ГГц або використовувати математичні методи відновлення інформації, частково втраченої в результаті процесу дискретизації.

Ключові слова: *комп'ютерне моделювання, спектрометричні сигнали, діджітайзер, методи аналізу оцифрованих сигналів, похибка дискретизації.*

Як цитувати: Рева С. М., Циблієв Д. О. Комп'ютерне моделювання спектрометричних сигналів з підвищеною деталізацією. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2025. вип. 65. С. 92-101. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-08

How to quote: S. Reva, and D. Tsybliyev, "Computer modeling of spectrometric signals with increased detailing", *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 65, pp. 92-101, 2025. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-08 [in Ukrainian]

© Рева С. М., Циблієв Д. О., 2025
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

1. Вступ. Актуальність дослідження

Комп'ютерні методи аналізу оцифрованих спектрометричних сигналів, зокрема рентгенівського та гамма-випромінювання, набули широкого розвитку за останні десятки років. Під поняттям «спектрометричного сигналу» зазвичай розуміють послідовність імпульсів, яка генеруються детекторами рентгенівського, гамма та іншого іонізуючого випромінювання [1]. В цифровій спектрометрії для запису таких сигналів з метою їх подальшого аналізу використовуються спеціальні пристрої — оцифровувачі (англ: digitizer), у якості яких застосовуються спеціалізовані аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) конвеєрного типу. Провідні компанії, які займаються їх розробкою та виробництвом, сьогодні пропонують широкий асортимент таких пристроїв [2]. Частота дискретизації (оцифрування) вхідного аналогового сигналу в залежності від моделі може становити від 100 МГц до 3 ГГц і навіть більше. Загалом сигнали, що надходять на вхід оцифровувача, можуть бути попередньо оброблені за допомогою тих чи інших аналогових пристроїв, що відфільтровують їх від шуму, змінюють форму, тощо, однак при цьому не змінюється їх призначення: вони несуть в собі інформацію про енергію частинок випромінювання, що були зареєстровані детектором, і можуть бути оброблені методами комп'ютерного аналізу для побудови енергетичного спектру та інших досліджень. Оцінкою ефективності застосування тих чи інших методів цифрової обробки спектрометричних сигналів має бути ступінь достовірності отриманих результатів та їх відповідність реальним сигналам, які були зареєстровані детектором під час експерименту. Проте, існує проблема об'єктивного оцінювання ефективності того чи іншого комп'ютерного методу аналізу, оскільки немає можливості отримання повністю достовірних вхідних даних через випадковість та непередбачуваність процесів на вході детектора. Експериментальні методи досліджень є досить затратними і оцінюють ефективність комп'ютерної обробки лише за непрямими параметрами для чітко визначених умов експерименту. Вирішити цю проблему можна за допомогою комп'ютерного моделювання цифрових вхідних даних із заздалегідь відомими параметрами.

Так, у роботі [3] була представлена формула моделювання цифрового сигналу, що відповідає сигналу реєстрації гамма-квантів у сцинтиляційному детекторі в аналітичній формі. Оскільки аналоговий сигнал з детектора оцифровується діджітайзером з певною частотою дискретизації, то також була наведена формула генерації сигналу в дискретній формі, яка має наступний вигляд:

$$s_i = z_i + n_i + \sum_{j=0}^{L} A_j\, p(i - t_j)\,, \tag{1.1}$$

де i – порядковий номер дискретного кадру з діджітайзера, s_i – значення сигналу, z – константа або дуже повільні зміни в часі порівняно до компоненти ширини імпульсу сигналу (базова лінія сигналу); n – компонента шуму, що накладається на сигнал, L – число зареєстрованих імпульсів, A_j та t_j є амплітудою та часом реєстрації імпульсу j, $p(t)$ – форма імпульсу, що згенерований одним зареєстрованим квантом (більш детально описана в статті [3]).

Як було розглянуто в роботі [4], використовуючи формулу (1.1) можна програмно згенерувати цифровий образ сигналу для певної частоти дискретизації діджітайзера, наприклад 250 МГц, 500 МГц, тощо. Приклад схематичної візуалізації такого цифрового сигналу, який не містить електричний шум, наводиться на рисунку 1.1. На цьому рисунку зображено також точки дискретизації (оцифрування) імпульсного аналогового сигналу. Горизонтальне положення кожної точки відповідає часу реєстрації миттєвого значення напруги, а вертикальне — відображає результат умовного аналого-цифрового перетворення цієї напруги. Послідовність отриманих значень у вигляді масиву чисел зберігається у пам'яті комп'ютера і являє собою цифровий образ сигналу. В подальшому, згенеровані дані можуть бути використані як вхідні дані для перевірки і оцінки точності роботи методів розпізнавання та аналізу основних параметрів спектрометричних сигналів, таких як час реєстрації та амплітуди імпульсів.

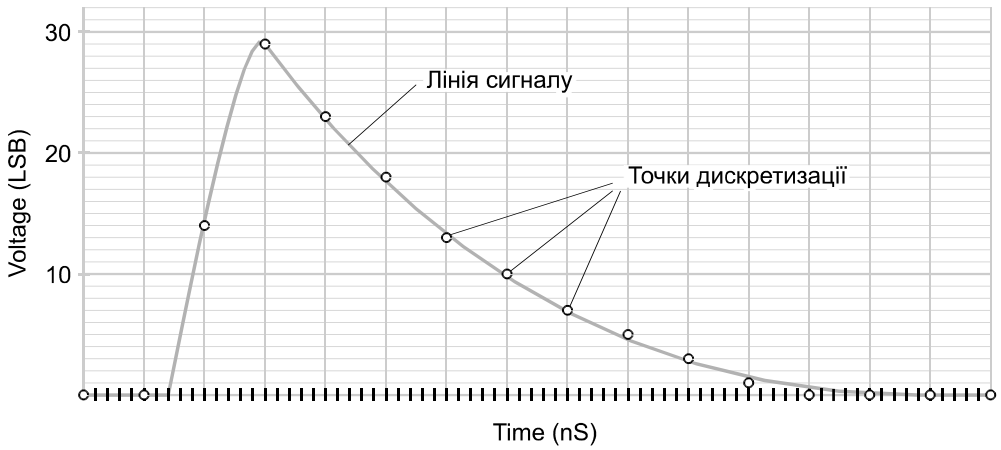


Рис. 1.1 Візуалізація імпульсного сигналу з відміченими точками дискретизації (оцифрування)
Fig. 1.1 Visualization of a pulse signal with marked sampling points (digitization)

Проте при оцифруванні аналогового сигналу з детектора випромінювання під час реальних експериментів, фактичні значення часу появи імпульсу або його пікового значення (амплітуди) можуть не співпадати з точками дискретизації, як показано на рисунку 1.2. На даному рисунку можна побачити, що час початку та пікове значення імпульсу знаходиться між точками дискретизації. Це, зокрема, може вносити похибку при визначенні амплітуди та часу реєстрації імпульсів простими методами комп'ютерного аналізу (наприклад методом Максимуму), яка спричинена саме процесом оцифрування сигналу. Чим вищою буде частота оцифрування, тим щільніше знаходитимуться точки дискретизації, і тим меншою має бути така похибка.

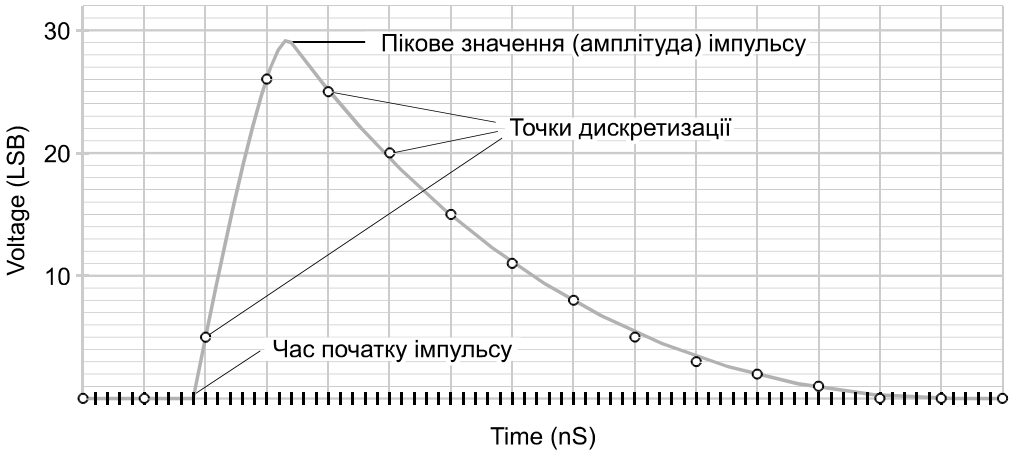


Рис. 1.2 Візуалізація імпульсного сигналу зі зміщенням часу появи та амплітуди імпульсу відносно точок дискретизації
Fig. 1.2 Visualization of a pulse signal with a shift in the time of occurrence and amplitude of the pulse relative to the sampling points

При розробці алгоритмів моделювання важливо врахувати ці фактори. Тому, насамперед, актуальною задачою є розробка моделі та алгоритмів, які дозволяють генерувати цифровий образ сигналу з підвищеною деталізацією та можливим зміщенням фаз імпульсів відносно точок дискретизації, що зробить змодельований сигнал більш наближеним до даних, що отримуються під час реальних експериментів. Також актуальним завданням є моделювання ідеалізованого сигналу з відомими параметрами та визначення величини максимальної похибки при розпізнаванні амплітуди імпульсів простими методами аналізу, яку може вносити дискретизація аналогового сигналу, в залежності від частоти оцифрування. На практиці це може бути використано з метою тестування при створенні нових та вдосконаленні існуючих комп'ютеризованих систем для спектрального аналізу. Окрім цього, дані про максимальну похибку дискретизації сигналу можуть допомогти при виборі найбільш підходящої моделі оцифровувача і частоти оцифрування для умов конкретного експерименту.

2. Мета та задачі дослідження

Метою дослідження є підвищення точності комп'ютерного моделювання спектрометричних сигналів шляхом розробки математичної моделі та алгоритмів моделювання з покращеною деталізацією цифрового образу сигналу. Це дасть можливість моделювати масиви даних, які є більш наближеними до реальних сигналів, та дослідити ефективність роботи методів спектрометричного аналізу. Окрім цього, генерація образу сигналу з урахуванням можливого зміщення фази імпульсів відносно точок дискретизації дозволить оцінити похибку при визначенні параметрів імпульсів (час реєстрації, амплітуда), яка зумовлена оцифруванням аналогового сигналу діджітайзером з певною частотою.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні задачі:

- розробити підхід до моделювання спектрометричного імпульсного сигналу з використанням регульованого коефіцієнту деталізації процесу генерації цифрового образу сигналу;
- змоделювати еталонні вхідні дані для комп'ютерного аналізу з ідеалізованим (сталим) розподілом амплітуд імпульсів використовуючи розроблені алгоритми;
- виконати програмний аналіз еталонного цифрового сигналу методом Максимуму та визначити величину максимальної похибки при розпізнаванні амплітуд імпульсів, що зумовлена дискретизацією аналогового сигналу, для різних частот оцифрування сигналу діджітайзером.

3. Методи дослідження

Теоретичні основи дослідження базуються на використанні: математичного та комп'ютерного моделювання, чисельних методів, алгоритмів аналітичної обробки та інтелектуального аналізу великих масивів даних. Крім цього, були використані методи візуалізації інформації та власні розроблені алгоритми.

В ході дослідження розробляється програма, що реалізує можливість комп'ютерного моделювання [5] цифрового образу спектрометричного сигналу. Додаток надає можливість симулювати наближений до реального сигнал з попередньо вказаним законом розподілу амплітуд імпульсів, ідеалізований сигнал (зі сталим або лінійним розподілом амплітуд) або завантажити дані, отримані безпосередньо за допомогою діджітайзера. Однак, на відміну від чітко визначеного спектрального складу, під час симуляції програма забезпечує випадковий розподіл імпульсів у часі, що наближує результат до даних реального експерименту та створює деяку неоднозначність цифрового образу сигналу.

В програмі було реалізовано два існуючі методи по визначенню параметрів спектрометричних сигналів (метод Максимуму та метод Підбору). Також був розроблений новий метод аналізу під назвою Відстеження [6] з використанням власних алгоритмічних підходів. Результати роботи вищезазначених методів візуалізуються у вигляді числових параметрів, часових діаграм сигналів та гістограм спектрів, побудованих на основі проведеного аналізу. Для перевірки правильності розпізнавання було розроблено алгоритм верифікації, який порівнює згенеровані імпульси із розпізнаними в межах допустимих діапазонів відхилення, які можуть бути задані в інтерфейсі програми. Додаток розробляється на мові програмування C++ (стандарту 14, 17) [7, 8] з використанням бібліотеки QT [9]. Ця бібліотека була обрана через те, що містить широкий набір графічних компонентів для візуалізації даних, а також дозволяє створювати кросплатформне програмне забезпечення.

4. Результати

4.1. Реалізація підходу до моделювання спектрометричного імпульсного сигналу з використанням регульованого коефіцієнту деталізації процесу генерації цифрового образу сигналу

Для моделювання вхідних даних оцифровувача, які забезпечують достатню міру подібності змодельованого сигналу до реального сигналу, що формується фізичним пристроєм, необхідно дотриматися кількох умов:

1. Окремі імпульси у складі спектрометричного сигналу можуть з'являтися у будь-який момент часу і не мають жодної прив'язки до частоти дискретизації. Час появи імпульсу має визначатися за допомогою генератора випадкових чисел з лінійним розподілом в межах тривалості експерименту.

2. Програмний алгоритм моделювання значень сигналу має працювати з дискретністю, яка на порядок або більше перевищує дискретність процесу оцифрування сигналу. Тобто, якщо частота оцифрування становить 100 МГц (період 10 нс), то програмний крок генерації миттєвих значень сигналу у часі має бути не більшим ніж 1 нс.
3. Згенеровані значення сигналу мають задаватися на порядок точніше ширини каналу АЦП (LSB) і повинні бути представлені числами с плаваючою точкою (float). Для проведення числових експериментів на ідеалізованих спектрах тестові монохромні сигнали (сигнали сталої амплітуди, що відповідають значенню енергії деякого монохромного випромінювання) в каналі N мають генеруватися із точним значенням амплітуди без вірогідної складової сигналу, а сигнали фонового заповнення (рівномірно розподілений фон або Комптонівське розсіювання) — як N + δ, де δ - випадкова складова рівномірно розподілена в межах від -0.5 до +0.4999…..

Враховуючи вищезазначені умови, при моделюванні цифрового образу сигналу з певною частотою оцифрування F_d діджітайзера, яка задається в інтерфейсі програми, було введено поняття коефіцієнту деталізації молодшого розряду діджітайзера (LSB) – D_{coeff}. Таким чином, програмна генерація сигналу виконується з частотою дискретизації F_m, яка виражається наступною формулою:

$$F_m = F_d \times D_{coeff} \tag{4.1}$$

Значення коефіцієнту D_{coeff} може змінюватися в налаштуваннях додатку і по замовчуванню є рівним десяти, щоб забезпечувати дискретність, яка на порядок перевищує задану частоту оцифрування при моделюванні експерименту. Використовуючи формулу (1.1) ми можемо програмно згенерувати масив значень сигналу *S[i]*, розмір якого обчислюється за формулою:

$$S_{size} = F_d \times D_{coeff} \times T\ , \tag{4.2}$$

де S_{size} - розмір масиву змодельованих значень сигналу, F_d - частота оцифрування діджітайзера (в герцах), D_{coeff} - коефіцієнт деталізації молодшого розряду діджітайзера, T - тривалість моделювання експерименту (в секундах).

На рисунку 4.1 наведено приклад візуалізації згенерованого в додатку імпульсного сигналу з амплітудою 2048 LSB при заданій частоті діджітайзера 250 МГц і коефіцієнті деталізації рівним 12ти (тобто програмний алгоритм генерації цифрових даних виконується з частотою дискретизації 3.0 ГГц). Точки дискретизації програмно візуалізовано для частоти дискретизації 250 МГц.

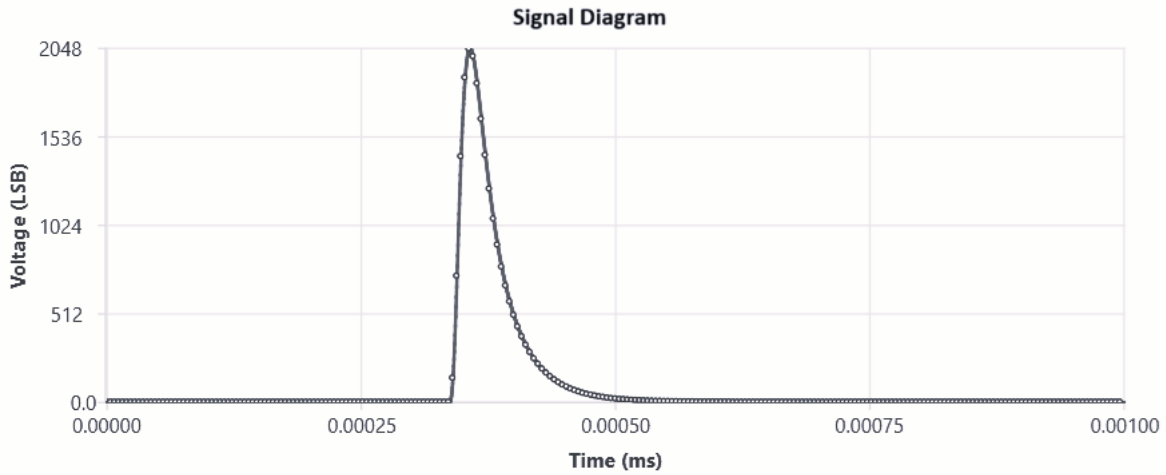


Рис. 4.1 Візуалізація згенерованого імпульсного сигналу з точками дискретизації (оцифрування)
Fig. 4.1 Visualization of the generated pulse signal with sampling points (digitization)

Важливо зауважити, що комп'ютерні методи аналізу, які виконуватимуть розпізнавання основних параметрів імпульсів (час реєстрації, амплітуди) на змодельованих вищезазначеним чином масивах даних, мають працювати із вхідними даними тільки в точках дискретизації з

частотою оцифрування діджітайзера F_d і з округленими цілими значеннями рівня сигналу, а не з більш деталізованими значеннями. Адже під час реальних фізичних експериментів можуть бути отримані цифрові дані (цілі числа, LSB) тільки з частотою оцифрування діджітайзера (F_d), який використовується в обладнанні експерименту. Тому, в алгоритмах аналізу програмна ітерація по масиву даних *S[i]*, що містить значення змодельованого сигналу (float) з певним коефіцієнтом деталізації D_{coeff}, має відбуватися наступним чином (приклад на мові програмування C++):

```
for(uint64_t i = 0; i < S.size(); i+=Dcoeff)
{
    int signal_value = std::round(S[i]);

    // digitized signal value processing…
}
```

Тобто для отримання номеру каналу діджітайзера, якому відповідає змодельоване деталізоване значення сигналу (число з плаваю точкою), це значення повинне округлятися до найближчого цілого числа. Наприклад, значення сигналу від 6.5 до 7.4999… будуть потрапляти в канал діджітайзера під номером 7.

4.2. Моделювання еталонних вхідних даних для комп'ютерного аналізу з ідеалізованим (сталим) розподілом амплітуд імпульсів

Для того, щоб мати можливість оцінити величину максимальної похибки при визначенні амплітуди, яку може вносити саме процес оцифрування аналогового сигналу з детектора, насамперед потрібно було змоделювати ідеалізовані вхідні дані для аналізу з відомими параметрами і без електричного шуму. В подальшому можна проаналізувати такі дані простим методом Максимуму для визначення амплітуди імпульсів і визначити різницю між згенерованими та розпізнаними значеннями амплітуд. Тому в додатку було послідовно згенеровано образи цифрового імпульсного сигналу зі сталим розподілом амплітуд імпульсів (тобто всі імпульси мали однакову амплітуду) для різних частот оцифрування діджітайзером. Сеанси моделювання було виконано з наступними параметрами:

- інтенсивність генерації імпульсів (рівень завантаження детектора) — 1000 імпульсів за секунду;
- тривалість модельованого експерименту (T) — 1 секунда;
- рівень базової лінії сигналу (z) – 0 LSB;
- значення амплітуд імпульсів – 2048 LSB (діджітайзера);
- рівень електричного шуму, що накладається на сигнал (n) – 0 LSB;
- частоти оцифрування діджітайзером (F_d) – 100 МГц, 250 МГц, 500 МГц, 750 МГц, 1 ГГц, 1.5 ГГц, 2 ГГц.
- коефіцієнти деталізації молодшого розряду діджітайзера (D_{coeff}) для вищезазначених частот оцифрування відповідно – 60, 24, 12, 8, 6, 4, 3;

Коефіцієнти деталізації молодшого розряду діджітайзера (D_{coeff}) було обрано таким чином, щоб внутрішня програмна генерація значень сигналу для кожної частоти оцифрування діджітайзера F_d відбувалося на однаковій частоті дискретизації F_m рівній 6 ГГц (згідно формули (4.1)). Параметр інтенсивності генерації імпульсів (рівень завантаження детектора) був обраний рівним 1000 імпульсів за секунду для того, щоб ймовірність накладання імпульсів один на одного була дуже низькою і фактично накладань не було. Час появи кожного імпульсу визначався випадковим чином за допомогою генератора випадкових чисел з рівномірним розподілом у діапазоні тривалості експерименту. Результат моделювання цифрового образу сигналу в додатку наводиться на рисунку 4.2, де відображається частина змодельованого сигналу зі сталим розподілом амплітуд імпульсів.

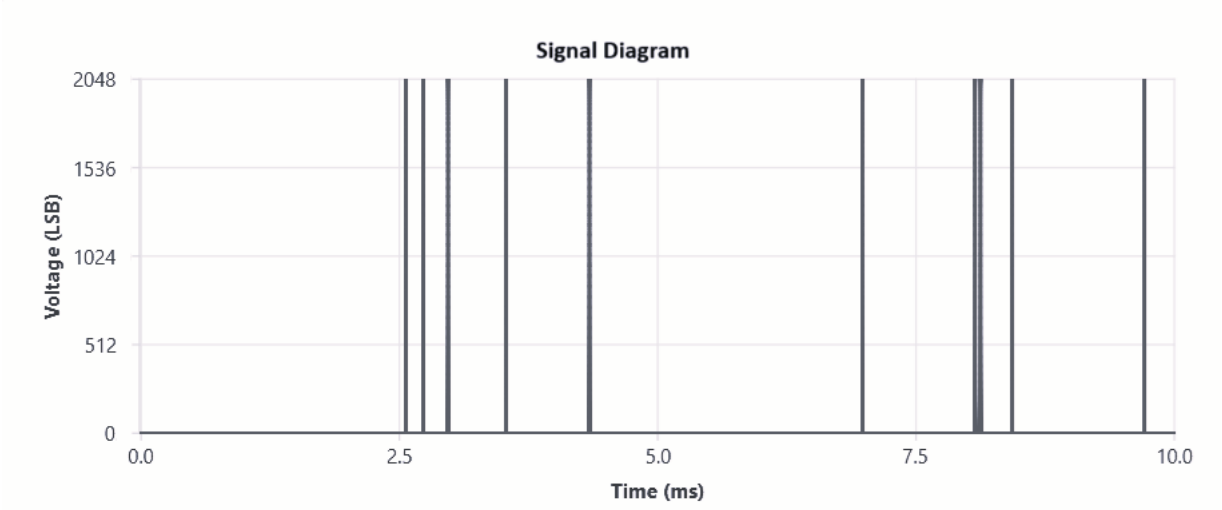


Рис. 4.2 Програмно згенерований сигнал зі сталим розподілом амплітуд імпульсів
Fig. 4.2 Software-generated signal with constant pulse amplitude distribution

4.3. Програмний аналіз еталонного цифрового сигналу методом Максимуму та визначення максимальної величини похибки при розпізнаванні амплітуд імпульсів, що зумовлена дискретизацією аналогового сигналу

З метою визначення величини максимальної похибки при визначенні амплітуд імпульсів, яку може вносити оцифрування сигналу, змодельований еталонний монохромний сигнал був проаналізований методом Максимуму [3]. Даний метод є досить простим, принцип його роботи полягає в наступних кроках:

1. Визначення набору інтервалів, на яких значення сигналу перевищує значення базової лінії (рівень електричного сигналу за умови відсутності імпульсів у поточний період часу) на величину встановленого порогу (регульований параметр методу). Тобто, для кожного значення сигналу s_i потрібно знайти всі інтервали індексів $B_j...E_j$, в яких $\forall i \in [B_j..E_j] : |s_i| > r$, де r – поріг дискримінації. Ці інтервали відображають початок і кінець кожного імпульсу.

2. Визначення локального максимуму значення сигналу в кожному інтервалі, який і буде прийнято за амплітуду імпульсу.

Як зазначалося раніше, алгоритми методів аналізу, зокрема методу Максимуму, працюють лише з точками дискретизації сигналу з частотою діджітайзера F_d і визначають амплітуду імпульсу як максимальне значення сигналу саме по точкам дискретизації. Тому різниця між значенням амплітуди імпульсу, розпізнаним методом Максимуму, та заданим при моделюванні значенням (2048 LSB) і буде визначати похибку при визначенні амплітуди, зумовлену процесом оцифрування. Адже інші фактори впливу, такі як електричний шум або накладання імпульсів, є відсутні. В додатку реалізовано алгоритм верифікації, який порівнює масиви згенерованих і розпізнаних імпульсів після аналізу (з певними порогами відхилення за часом появи та амплітуді) та визначає, який відсоток виявлених певним методом імпульсів співпадає з тими, що були змодельовані. За допомогою алгоритму верифікації для кожного сеансу моделювання сигналу з певною частотою було визначено мінімальні пороги відхилення по амплітуді, при яких всі згенеровані імпульси є розпізнаними і верифікованими. Ці відхилення і визначають максимальні значення похибок, які зумовлені дискретизацією сигналу. На рисунку 4.3 візуалізовано розподіл амплітуд (спектр) імпульсів, розпізнаних методом Максимуму, для вхідних даних змодельованих з частотою оцифрування 250 МГц та коефіцієнтом деталізації молодшого розряду діджітайзера рівним 24. Вісь X даної діаграми містить значення амплітуд виявлених імпульсів, а вісь Y – їх кількість. Як бачимо, діапазон амплітуд з ненульовою кількістю розпізнаних імпульсів містить значення від 2025 до 2048 LSB (при змодельованому значенні 2048 LSB). Тому максимальна похибка, що зумовлена дискретизацією, в даному випадку є рівною 23 LSB. В таблиці 1 наводяться підсумкові результати, які містять максимальні значення похибок (в LSB) при визначенні амплітуд імпульсів методом Максимуму для різних значень частот оцифрування діджітайзером.

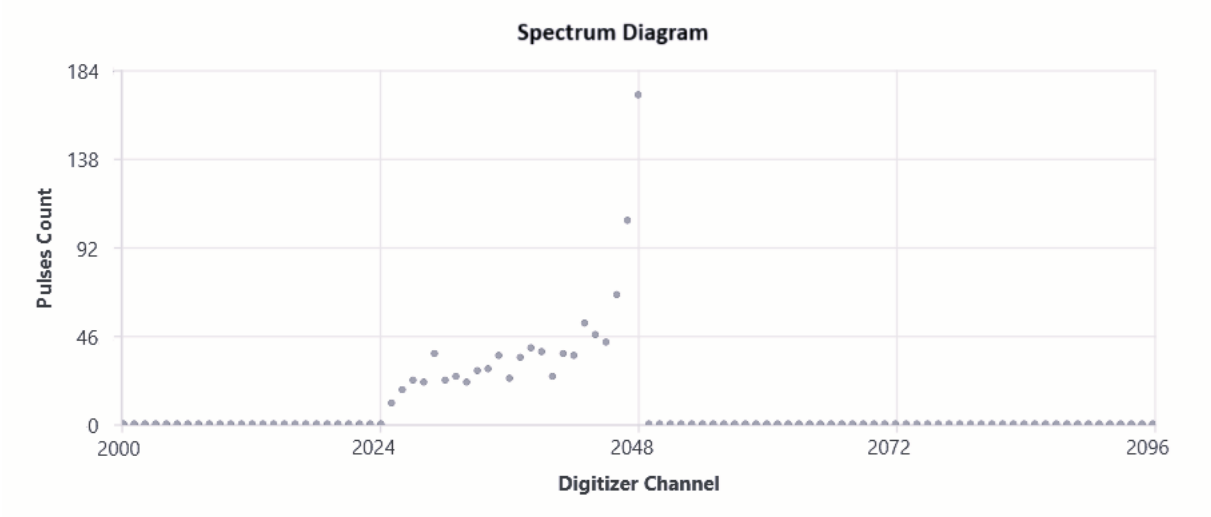


Рис. 4.3 Розподіл амплітуд (спектр) імпульсів, розпізнаних методом Максимумів для сценарію моделювання з частотою 250 МГц та коефіцієнтом деталізації рівним двадцяти чотирьом
Fig. 4.3 Distribution of amplitudes (spectrum) of pulses recognized by the Maximum method for a simulation scenario with a frequency of 250 MHz and a resolution coefficient equal to twenty-four

Таблиця 1. Дані про значення максимальної похибки дискретизації при визначенні амплітуди імпульсів в залежності від частоти оцифрування діджітайзера
Table 1. Values of maximum sampling error when determining pulse amplitude depending on the digitizer sampling frequency

Частота оцифрування (МГц)	Коефіцієнт деталізації молодшого розряду діджітайзера	Амплітуда змодельованих імпульсів (LSB)	Максимальна похибка дискретизації (LSB)
100	60	2048	137
250	24	2048	23
500	12	2048	6
750	8	2048	3
1000	6	2048	1
1500	4	2048	1
2000	3	2048	0

З даних наведених в таблиці 1 можна побачити, що при частоті оцифрування діджітайзером 100 МГц максимальна похибка дискретизації сигналу є досить великою і становить близько 137 LSB. При використанні діджітайзера з частотою оцифрування 1 ГГц і 1.5 ГГц значення такої похибки становить 1 LSB, а при частоті 2 ГГц і вище – 0 LSB. Для досягнення максимальної точності вимірювання амплітуд імпульсів ці дані потрібно враховувати при виборі моделі оцифровувача та частоти дискретизації сигналу для конкретного експерименту.

Висновки

1. В рамках дослідження було розроблено підхід до комп’ютерного моделювання оцифрованих спектрометричних сигналів з використанням регульованого коефіцієнту деталізації молодшого розряду оцифровувача. Це дозволяє програмно генерувати цифровий образ сигналу з дискретністю, яка на порядок або більше перевищує частоту оцифрування діджітайзером, та враховує можливе зміщення фаз імпульсів відносно точок дискретизації. Таке моделювання спектрометричного сигналу є більш наближеним до оцифрованих сигналів, отриманих під час реальних експериментів. В подальшому використання розроблених алгоритмів моделювання та створеного програмного забезпечення дозволять краще дослідити ефективність комп’ютерних методів розпізнавання і аналізу параметрів спектрометричних сигналів.

2. Було програмно реалізовано розроблені алгоритми моделювання та згенеровано еталонні вхідні дані для комп’ютерного аналізу з ідеалізованим (сталим) розподілом амплітуд імпульсів.

Створений образ сигналу не містив електричного шуму та накладань імпульсів, тому подальший аналіз таких вхідних даних методом Максимуму дозволив визначити величину похибки при визначенні амплітуд імпульсів, яка зумовлена дискретизацією аналогового сигналу.

3. Було визначено максимальні значення похибок дискретизації сигналу для різних частот оцифрування діджітайзером, шляхом програмного аналізу еталонного сигналу методом Максимуму та застосування алгоритму верифікації розпізнаних імпульсів. Наведені результати свідчать, що для мінімізації похибки визначення амплітуди (досягнення рівня 1 LSB або менше), яку вносить дискретизація аналогового сигналу, потрібно використовувати діджітайзери з частотою дискретизації 1 ГГц або вище. Врахування впливу такої похибки може бути особливо важливим при проведені реальних експериментів з використанням напівпровідникових або сцинтиляційних детекторів з низьким рівнем власних шумів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, 2010, 864p.
2. Spectrum Instrumentation Official Website. URL: https://spectrum-instrumentation.com/products/digitizer/index.php (дата звернення: 05.04.2025)
3. E.M. Khilkevitch, A.E. Shevelev, I.N. Chugunov, M.V. Iliasova, D.N. Doinikov, D.B. Gin, V.O. Naidenov, I.A. Polunovsky, Advanced algorithms for signal processing scintillation gamma ray detectors at high counting rates. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2020. Volume 997. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900220307051 (дата звернення: 05.04.2025)
4. Рева С.М., Циблієв Д.О., Математичні моделі та алгоритми комп’ютерного моделювання спектрометричних сигналів. Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, сер. «Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління». 2023. т. 58. С.64-74. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-01 (дата звернення: 05.04.2025)
5. A. M. Law, W. D. Kelton, Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill, 2000, 760p.
6. Рева, С.М., Циблієв, Д.О., Розробка комп’ютерного методу розпізнавання та аналізу параметрів спектрометричних сигналів. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Т. 6, 9 (132), 86–96. DOI: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318558 (дата звернення: 05.04.2025)
7. S. Meyers, Effective Modern C++: 42 Specific Ways to Improve Your Use of C++11 and C++14. O'Reilly Media, Inc. Addison-Wesley, 2014, 320p.
8. A. Drozdek, Data Structures and Algorithms in C++. Brooks/Cole, 2001, 650p.
9. QT Framework Official Website. Available at: https://www.qt.io/product/framework (дата звернення: 05.04.2025)

REFERENCES

1. G. F. Knoll, Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, 2010, 864p.
2. Spectrum Instrumentation Official Website. URL: https://spectrum-instrumentation.com/products/digitizer/index.php (last accessed: 05.04.2025)
3. E.M. Khilkevitch, A.E. Shevelev, I.N. Chugunov, M.V. Iliasova, D.N. Doinikov, D.B. Gin, V.O. Naidenov, I.A. Polunovsky, Advanced algorithms for signal processing scintillation gamma ray detectors at high counting rates. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators Spectrometers Detectors and Associated Equipment. 2020. Volume 997. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0168900220307051 (last accessed: 05.04.2025)
4. S.M. Reva, D.O. Tsybliyev, “Mathematical models and algorithms of computer modeling of spectrometric signals” Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University, series “Mathematical modeling. Information technology. Automated control systems, vol. 58, pp.64-74, 2023. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2023-58-01 (last accessed: 05.04.2025)
5. A. M. Law, W. D. Kelton, Simulation Modeling and Analysis. McGraw-Hill, 2000, 760p.

6. S. M. Reva, D.O. Tsybliyev, Devising a computer method to recognize and analyze spectrometric signals parameters. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2024. Volume 6 (9 (132), 86–96. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.318558 (last accessed: 05.04.2025)
7. S. Meyers, Effective Modern C++: 42 Specific Ways to Improve Your Use of C++11 and C++14. O'Reilly Media, Inc. Addison-Wesley, 2014, 320p.
8. A. Drozdek, Data Structures and Algorithms in C++. Brooks/Cole, 2001, 650p.
9. QT Framework Official Website. Available at: https://www.qt.io/product/framework (last accessed: 05.04.2025)

Reva Sergiy *Candidate of Technical Science, Associate Professor of the Department of Computer Systems and Robotics; V. N. Karazin National University, Svobody Sq. 4, Kharkiv, Ukraine, 61022*
e-mail: iec-lab@karazin.ua;
https://orcid.org/0000-0002-2615-9226

Tsybliyev Denys *PhD Student, V. N. Karazin Kharkiv National University, Svobody Sq. 4, Kharkiv, Ukraine, 61022*
e-mail: dtsibliev@gmail.com
https://orcid.org/0009-0008-4373-8773

Computer modeling of spectrometric signals with increased detailing

Relevance. Computer methods for analyzing digitized spectrometric signals have been widely developed. However, there is a problem of objectively assessing the effectiveness of a particular digital processing method due to the randomness of processes at the input of the radiation detector, which can be solved by computer modeling of signal images with fully known parameters. To better match real digitized pulse signals, simulation algorithms should implement the possibility of a random shift in the time of occurrence and amplitude of pulses relative to the digitizer sampling points.
The goal of the research is to increase the accuracy of computer modeling of spectrometric signals by developing modeling algorithms with increased detailing of the digital signal image. An additional task is to estimate the maximum margin of error in determining pulse parameters using simple analysis methods, which arises when determining the pulse amplitude and which is caused by the process of discretization at different frequencies.
Research methods are based on mathematical and computer modeling, include numerical methods, and use proprietary algorithms. As part of the research, an application is being developed that is capable of generating digital images of spectrometric signals with specified parameters and contains software-implemented methods for their analysis.
The results. An approach to modeling pulse signals using an adjustable coefficient of their amplitude and time parameters detailing was developed. Using this approach, a detailed image of a signal with a constant amplitude of pulses and their random distribution in time was generated, and the modeling of its discretization process was carried out at different clock frequencies. The obtained data were analyzed using the Maximum method and the maximum margins of errors in recognizing amplitudes, which are caused by the discretization process itself, were determined.
Conclusions. The developed modeling algorithm allows to programmatically generate a digital image of a signal with a discreteness that brings it closer to a real analog signal. At the same time, the accuracy of its simulation exceeds the resolution of modern digitizers by at least an order of magnitude. The results of research using the developed algorithms indicate that to minimize margin of errors caused by discretization, it is necessary to use digitizers with a clock frequency of more than 1 GHz or to use mathematical methods to restore information partially lost as a result of the discretization process.

Keywords: *computer modeling, spectrometric signals, digitizer, digitized signals analysis methods, discretization margin of error.*

Надійшла у першій редакції 25.02.2025, в останній - 27.03.2025.
The first version has been received on 25.02.2025, the final version - on 27.03.2025.

DOI: https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-09

УДК 355.14+519.60

Yarovenko Vadim *Post graduate student*
Kharkiv National University of Radio Electronics
Nauky Ave. 14, Kharkiv, 61166, Ukraine
e-mail: vadym.yarovenko@nure.ua;
https://orcid.org/0009-0004-7116-2493

Improving the Accuracy of Target Coordinate Estimation in an Automated Acoustic System through Temporal Characteristics Analysis

The aim of the paper is developing an algorithm to enhance targeting accuracy by establishing a functional relationship between the bearing-angle error and the width of the time-decryption window, thereby improving the precision with which automated acoustic systems determine target coordinates

Relevance. Artillery acoustic reconnaissance (AAR) is a key component of counter-battery operations, as it enables covert, round-the-clock detection and high-precision localization of enemy firing positions by capturing and processing acoustic signals from gunfire and explosions. However, the practical effectiveness of conventional sound-ranging systems is significantly limited by the nonlinear influence of spatiotemporal gradients in meteorological fields (temperature and wind) and by errors in topogeodetic support. These factors cause considerable systematic and random shifts in the phase and time characteristics of signals, which in turn degrade the accuracy of spatial target localization.

Research methods. This paper develops a generalized mathematical model of the acoustic direction-finding process, in which the vertical-layered atmospheric profiles are described as piecewise-constant sub-models of a stratified medium, with rational approximations of temperature gradients and horizontal wind components. To enhance signal decoding robustness in environments with background noise, adaptive time windows with variable apodization are introduced, synchronized with the spectral evolution of the muzzle blast impulse. Based on this model, analytical expressions are derived for correcting phase and time shifts, which are integrated into a modified target localization algorithm for the standard AAR system AZK-7.

The results. Numerical experiments conducted for typical scenarios of unstable atmospheric stratification (inversion, isothermy, and super-adiabatic gradients) demonstrate a reduction in the root mean square error of coordinate estimation. The proposed approach does not require hardware upgrades and can be implemented within the software of existing sound-ranging systems of the Armed Forces of Ukraine by updating the data processing and ballistic computation modules. It is expected that this will increase the probability of neutralizing enemy batteries with the first counter-battery salvo by 10–15%, reduce the average response time of fire units by 30–40%, and lower ammunition expenditure in the forward zone.

Conclusion. A relationship between the temporal decoding window value and the error in determining the directional angle of the target, based on measurements from one of the base points, has been identified, and an algorithm for determining and accounting for this error magnitude has been developed. Prospects for further research include automated consideration of actual terrain relief using digital elevation models and the potential integration of unmanned aerial systems equipped with radio-acoustic sounding tools for real-time meteorological data updates.

Keywords: *acoustic reconnaissance, automated acoustic system, hardware-software complex, acoustic baseline, geometric baseline, acoustic ray, temporal decoding.*

How to quote: V. Yarovenko, “Improving the Accuracy of Target Coordinate Estimation in an Automated Acoustic System through Temporal Characteristics Analysis” *Bulletin of V. N. Karazin Kharkiv National University, series Mathematical modelling. Information technology. Automated control systems*, vol. 65, pp.102-110, 2025. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-09

Як цитувати: Yarovenko V. Improving the Accuracy of Target Coordinate Estimation in an Automated Acoustic System through Temporal Characteristics Analysis. *Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна, серія. Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління*. 2025. вип. 65. С.102-10. https://doi.org/10.26565/2304-6201-2025-65-09

1 Introduction

The combat operations during the Russo-Ukrainian war have highlighted a critical need within the fire support units of the Rocket Forces and Artillery to enhance the accuracy of artillery reconnaissance systems. This improvement is essential for precisely locating enemy firing positions in order to conduct effective counter-battery operations and reduce the impact of hostile artillery on the units of the Armed Forces of Ukraine. One such reconnaissance tool is the automated acoustic (sound-ranging) system. However, due to outdated equipment, the influence of meteorological conditions, and limitations in topographic referencing accuracy, these systems currently provide insufficient precision in target

© Yarovenko V., 2025
This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0.

coordinate determination. As a result, more ammunition is required to achieve effective counter-battery fire. An analysis of the tactical and technical characteristics of the AZK-7 system indicates that its target coordinate accuracy is insufficient for effective reconnaissance missions. When detecting a target at a distance of 10 km, the mean error in range is approximately 80 meters, and in direction — about 40 meters. This limitation is primarily due to one of the inherent disadvantages of acoustic reconnaissance: its strong dependence on meteorological conditions and terrain features. For instance, crosswinds can alter the direction of acoustic wave propagation, while the vertical distribution of meteorological elements can create either favourable or unfavorable conditions for reconnaissance. Under adverse conditions, the effective range of detection may decrease by a factor of 1.5 to 2. Additionally, accuracy is significantly affected by either the failure to account for or incorrect assessment of meteorological conditions and their variability along the acoustic propagation path. Moreover, the extended reconnaissance ranges impose stricter requirements on the accuracy of direction angle determination and the positioning of acoustic base lines. For example, a misalignment in the orientation of one of the 0–10 acoustic bases at a range of 15 km can result in a directional error of up to 150 meters and a range error of up to 300 meters. Such deviations may prevent target detection due to failure to meet the time decryption criteria.

Thus, enhancing the accuracy of target coordinate determination by automated acoustic systems through the analysis of time decryption data during target acquisition represents a current and significant research challenge.

2 Problem formulation and literature review

In recent years, the rapid advancement of computational technologies has enabled the widespread use of virtual computer experiments as a substitute for costly and sometimes hazardous full-scale physical tests. This shift has significantly reduced development time and expenses while enhancing design flexibility and safety. A number of efficient and highly accurate numerical methods have been developed, such as the finite element method (FEM), boundary element method (BEM), and computational fluid dynamics (CFD).These methods are now routinely employed in the analysis of complex structures in rocket engineering [1, 2] and power equipment design [3, 4]. These approaches allow engineers to simulate real-world conditions with remarkable precision, supporting optimization and failure prediction in highly demanding environments/

In the current context of full-scale aggression against Ukraine, mathematical modeling has become increasingly focused on improving the accuracy of enemy firing position localization.

A review of the literature and published materials concerning the improvement of sound-ranging system accuracy [5–10] indicates that this issue has received considerable attention, with various potential solutions being explored. However, the phenomenon of temporal signal decoding remains largely unaddressed. In existing works [7-8], it is used solely for associating bearings to targets with specific acoustic events, or for detecting errors in the “VO” mode (topogeodetic error detection mode). A detailed analysis of the temporal decoding phenomenon has revealed the possibility of developing an algorithm whose implementation in the target localization process would significantly enhance the overall accuracy and operational efficiency of the system. Decoding is the process of selecting the true location of a target from an array of calculated coordinates by comparing the time difference of signal arrival at the base points (BPs) with the difference in distances from the target to the BPs. This process involves analyzing the time difference of arrival (TDOA) measurements and matching them with theoretical values derived from geometric considerations. By minimizing the discrepancy between measured and expected time differences (typically using optimization or statistical estimation techniques such as least squares or maximum likelihood) the algorithm identifies the most probable position of the target, effectively filtering out spurious or ambiguous solutions.

3 The research aim and problem statement

The main aim of the paper is developing an algorithm to enhance targeting accuracy by establishing a functional relationship between the bearing-angle error and the width of the time-decryption window, thereby improving the precision with which automated acoustic systems determine target coordinates.

The task of performing time-based decoding arises due to the need to determine the coordinates of several targets that simultaneously reveal themselves through the sounds of gunfire. In complex acoustic environments, sound receivers register streams of acoustic signals that are partially organized during the initial processing.

As a result, a set of data related to various targets, including the time of arrival of the acoustic signals, is stored in the memory of the Central Processing Module (CPM) for each BP. If this time is not taken into account and the coordinates of the target are determined based only on the obtained directions (by solving a triangulation problem), nine intersection points will be obtained. The coordinates of six of these points (X1, X2, X3, X4, X5, X6) will be false.

For example, without time-based decoding, three directions from two base points result in nine intersection points, but only three of these can be true (see Fig. 3.1).

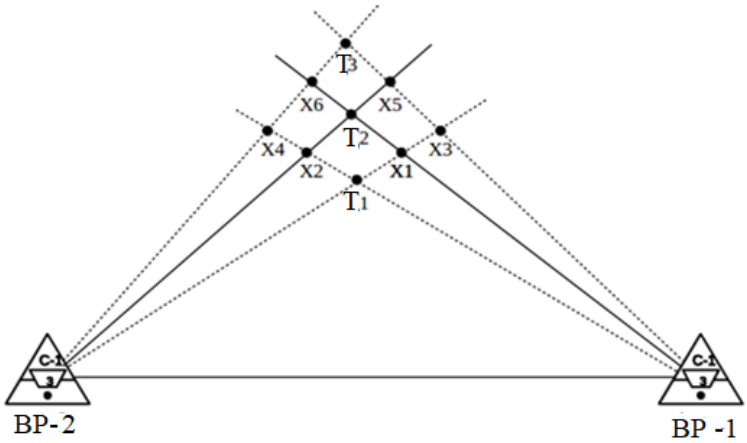


Figure 3.1. Target triangulation using two baseline points for simultaneous localization of multiple targets
Рисунок 3.1. Триангуляція цілі з використанням двох базових точок для одночасної локалізації множини цілей

Here BP-1, BP-2 are centers of the acoustic baselines used to determine the bearing to the target; T1, T2, T3 are true target coordinates; and X1, X2, X3, X4, X5, X6 are false target coordinates.

Thus, to perform temporal decoding, the signal arrival time is recorded with an accuracy of 2 ms, which allows for identification of the true target coordinates and elimination of false ones by computing the temporal decoding window.

4 Influence of topogeodetic referencing errors

Let us now consider the influence of topogeodetic referencing errors on the width of the temporal decoding window, i.e., the discrepancy between the actual and calculated time differences of signal reception at the baseline points.

To simplify the analysis, we choose a point such that the triangulation angle is close to 90° (see Fig. 4.1).

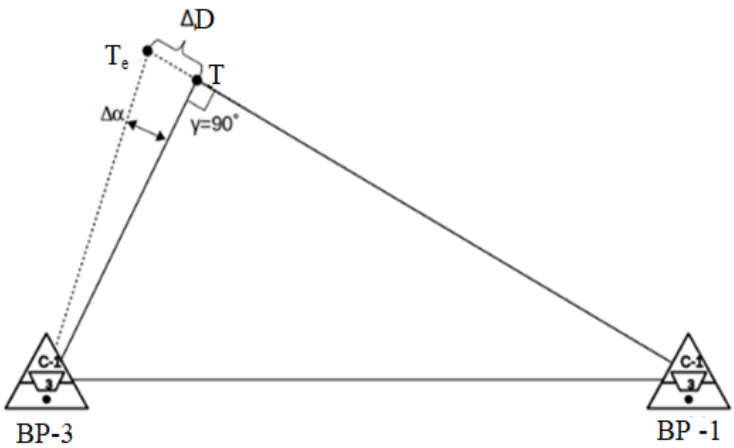


Figure 4.1. Influence of bearing angle error on target localization accuracy and the temporal decoding window

Рисунок 4.1. Вплив похибки кута пеленгування на точність локалізації цілі та часове вікно декодування

From Figure 4.1, it can be seen that the distance from the control point (CP) to base point BP-3 changes significantly less than the distance to base point BP-1, which changes by ΔD. Using the mil formula, the value of ΔD can be approximately calculated:

$$\Delta D = 0.001 D \Delta\alpha$$

Then the value of the temporal decoding window will change by ΔD / *c* (where *c* is the speed of sound in m/s). For example, for a target range of 4000 m and an orientation error of 0–10 mils, the difference in distances ΔD will be 40 m, and accordingly, the decoding window value for a sound speed of 340 m/s will be 0.1176 s. This value does not exceed the allowable limit of 0.8 s, but it can be detected by equipment operating with an accuracy of 0.002 s. Thus, based on the measured value of the temporal decoding window, it is possible to estimate the directional angle measurement error of the base point, assuming that all other top-geodetic reference data are accurate and that meteorological conditions remain uniform during the propagation of the acoustic wave.

To confirm this, we simulate the process of processing target interception results by secondary data processing equipment, in particular the determination of target coordinates and verification of the temporal decoding window. For this purpose, we use an Excel spreadsheet (Fig. 3) designed for manual processing of target interception results by base points. The directional angle error is assumed to be Δα = –0–10 mils. To perform this, it is necessary to use the Excel table? Presented in the Fig. 4.2 below

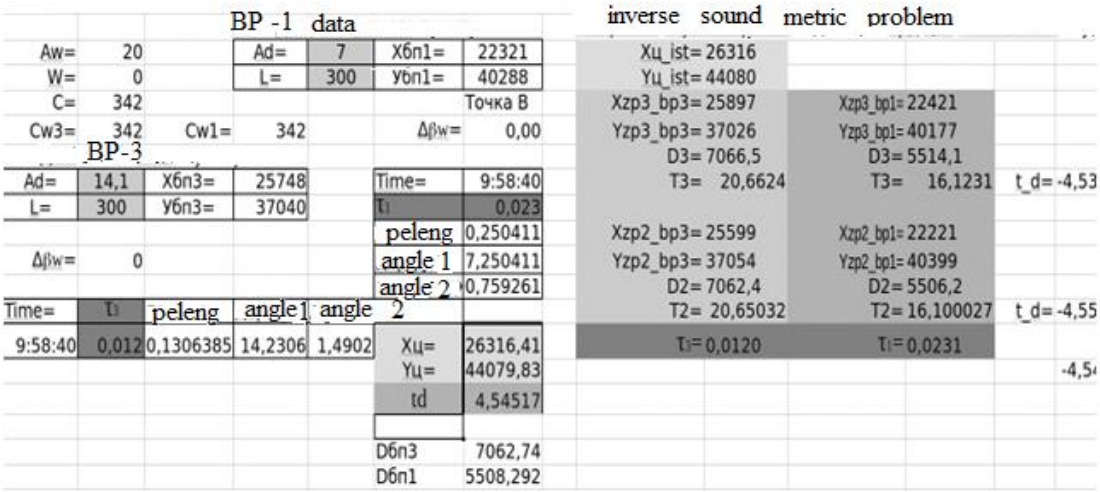


Fig. 4.2. Excel spreadsheet
Рис. 4.2. Електронна таблиця Excel

This Excel spreadsheet is used for directional angle error estimation.

5 Directional angle error estimations

The following algorithm is used for estimations of decoding window changes.

1. Using the inverse acoustic localization problem and the true coordinates, determine the time bearings τ for the first and third base points (τ_3 = 0.0120, τ_1 = 0.0231).
2. Insert the obtained τ values into the coordinate calculation algorithm and verify that the computed coordinates match the true ones.
3. Determine the time difference of acoustic signal arrival at BP-1 and BP-3 (td = 4.54517).
4. Introduce a bearing error (–0–10 mils) at the "bearing" input for base point BP-3 and record the change in the acoustic signal arrival time difference at BP-1 and BP-3 (td – 0.1).
5. Calculate the difference in temporal decoding windows, i.e., how the decoding window changes due to the directional angle error of the target, using Δtd = ((td – 0–10) – td). The calculation results are summarized in Table 1.

The results of calculation are presented in Table 5.1

Table 5.1 Results of temporal decoding window calculations
Таблиця 5.1 Результати розрахунків вікна тимчасового декодування

Target	Target Coordinates		Distances from Base Points to Target (m)		Time Differences (Temporal Bearing)		Signal Arrival Times at BP-1 and BP-3: Without Error (td) and With Error (td-0.1)		Temporal Decoding Window Δt_dec (td – td-0.1)
N	X Y	26402 43963	D3 D1	6955 5493	τ_{bp3} τ_{bp1}	0,0001 0,0001	td td-0,1	4,275 4,192	0,083
1	X Y	25700 41500	D3 D1	4462 3592	τ_{bp3} τ_{bp1}	0,0919 -0,332	td td-0,1	2,546 2,449	0,097
2	X Y	28000 46000	D3 D1	9239 8056	τ_{bp3} τ_{bp1}	-0,133 0,0484	td td-0,1	3,461 3,384	0,077
3	X Y	25750 46000	D3 D1	8961 6663	$\tau_{бп3}$ τ_{bp1}	0,0823 0,2567	td td-0,1	6,717 6,641	0,076
4	X Y	23500 44000	D3 D1	7315 3896	τ_{bp3} τ_{bp1}	0,3469 0,4434	td td-0,1	6,534 6,461	0,073
5	X Y	26400 40000	D3 D1	3034 4090	τ_{bp3} τ_{bp1}	-0,107 -0,631	td td-0,1	-3,085 -3,164	0,079
6	X Y	24939 40844	D3 D1	3891 2677	τ_{bp3} τ_{bp1}	0,2622 -0,438	td td-0,1	3,548 3,430	0,118
7	X Y	28000 41500	D3 D1	4991 5800	τ_{bp3} τ_{bp1}	-0,319 -0,438	td td-0,1	-2,368 -2,441	0,073

The data in the table indicate that for all cases of temporal bearings (target positions both in front and in depth), a consistent value of the temporal decoding window is observed. This value depends on the directional error Δα and, to a lesser extent, on the distance to the target. Thus, the modeling results confirm the theoretical considerations regarding the change in the temporal decoding window in the presence of a target coordinate determination error. For example, the theoretically calculated error value for the case when the interception angle is close to 90° is 0.118 s, which closely matches the modeling result of 0.1176 s, confirming the reliability of the obtained results. In the case where the interception angle is not a right angle, as illustrated in Figure 2, the algorithm for determining the directional angle error will differ slightly. Let us consider this in more detail (Fig. 5.1).

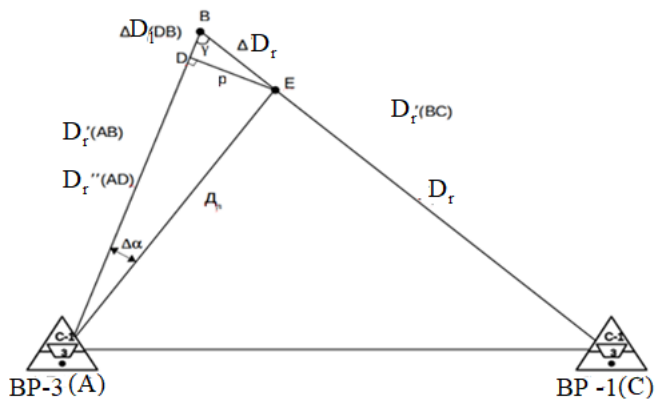


Fig. 5.1. Determination of the directional angle error from BP-3
Рис. 5.1. Визначення похибки кута напряму від BP-3

The presence of an angular error Δα changes the distances by ΔD_R and ΔD_L. To determine the magnitude of this change in distance, it is necessary to construct a segment p (segment ED in Figure 4), which forms a right triangle EBD. From the trigonometric relationships of the right triangle, the following formulas can be derived:

The presence of a directional angle error Δα results in changes to the distances, denoted as ΔD_p and ΔD_l. To determine the magnitude of these distance changes, it is necessary to construct segment p (segment ED in Figure 4), which forms a right triangle EBD. Based on the trigonometric relationships in the right triangle, the following formulas can be derived:

$$\Delta D_L = \frac{p}{\mathrm{tg}\gamma}, \qquad \Delta R_R = \frac{p}{\sin\gamma} \tag{5.1}$$

Thus, the difference in distances to the target will change by a value of ΔD

Based on the above, the following formulas can be derived:

$$\Delta D = \Delta D_R - \Delta D_L = \frac{p}{sin\,\gamma} - \frac{p}{tg\gamma}.$$

Simplifying we have

$$\Delta D = p\left(\frac{1}{\sin\gamma} - \frac{\cos\gamma}{\sin\gamma}\right) = p\left(\frac{1-\cos\gamma}{\sin\gamma}\right).$$

Next, we determine the value of *p*:

$$p = \Delta D \div \left(\frac{1-\cos\gamma}{\sin\gamma}\right) = \Delta t_{dec} \cdot c \div \left(\frac{1-\cos\gamma}{\sin\gamma}\right). \tag{5.2}$$

It follows from Figure 5.1 that

$$D_L^{''} = D_{L(AB)}^{'} - \Delta D_{L(DB)},\ D_L = \sqrt{\left(D_L^{''}\right)^2 + p^2}. \tag{5.3}$$

Using the previously obtained values of *p* and D_l, the sine of the angle Δα is determined based on the definition of the sine as the ratio of the side opposite the angle (*p*, equation (5.2)) to the hypotenuse D_l, calculated using equation (5.3).

$$\sin\Delta\alpha = \frac{p}{D_L}. \tag{5.4}$$

Using the formulas provided above, an algorithm was developed and calculations were performed using the data for Target No. 7 from Table 4.1. The algorithm computes:

1. The value of segment *p* according to formula (5,2).

$$p = 0{,}073 \cdot 340 \div \left(\frac{1-\cos(8{,}53\cdot 6)}{\sin(8{,}53\cdot 6)}\right) \approx 51{,}82.$$

2. The change in distance for the left base point (ΔD_l) according to formula (1).

$$\Delta D_L = \frac{51{,}82}{\mathrm{tg}(8{,}53\cdot 6)} \approx 41{,}69.$$

3. The refined distance to the target for the left base point according to formula (5.3).

$$D_L^{''} = 5034 - 41{,}69 \approx 4992{,}3,\ D_L = \sqrt{(4992{,}3)^2 + (51{,}82)^2} \approx 4992{,}6.$$

4. The value of the directional angle error for the left base point according to the formula (5.4).

$$\sin\Delta\alpha = \frac{51{,}82}{4992{,}6} \approx 0{,}01037,\ \Delta\alpha = \frac{\arcsin(0{,}01037)}{6} \approx 0{,}099 \approx 0 - 10.$$

5. The refined directional angle to the target from the left base point.

$$\alpha_L = 10 - 44 + 0 - 10 = 10 - 54.$$

6. Refined target coordinates obtained by solving the forward geodetic problem for the left base point, using the values of ΔD_l and α_L calculated in the previous steps.

For Target No. 7, the initial coordinates with error were: X = 28059, Y = 41512. After performing the calculations according to the algorithm, the coordinates were refined to: X = 27996.

The initial coordinate Y was 41512, and after performing the calculations according to the algorithm, the refined coordinates were: X = 27996, Y = 41499. Thus, the presented algorithm confirms its effectiveness by refining the target coordinates by 63 m along the X-axis and 13 m along the Y-axis.

Conclusion

The results of the analysis of the dependence of the temporal decoding window on meteorological conditions indicate that under uniform meteorological conditions in the acoustic ray propagation area, this window will be independent of whether meteorological conditions are taken into account. It has been established that an error in determining the directional angle of the target, based on measurements from one of the base points, leads to a change in the temporal decoding window. A relationship between the temporal decoding window value and the error in determining the directional angle of the target, based on measurements from one of the base points, has been identified, and an algorithm for determining and accounting for this error magnitude has been developed. The effectiveness of the algorithm has been confirmed by calculations performed using data from an Excel worksheet. For Target No. 7 from Table 4/1, the coordinate determination errors were 63 m along the X-axis and 13 m along the Y-axis. To more accurately determine the coordinates of a target that emits sound from a shot, it is advisable to calculate the temporal decoding window and, based on it, determine the error in the directional angle measurement from a base point, especially when it is impossible to establish an acoustic reference point. In cases where directional angles from two base points are determined with errors, accounting for the cumulative error for one base point will not reduce the accuracy of coordinate determination by the acoustic system.

In the future, the created algorithm can be implemented in the software of the modernized AZK-7 hardware-software complex, enabling automation of calculations according to the algorithm and improving the accuracy of target coordinate determination by the system.

REFERENCES

1. V. Merculov, M. Kostin, G. Martynenko, N. Smetankina, V. Martynenko (2022), Improving the accuracy of the behaviour simulation of the material of the turbojet aircraft engine fan rotor blades in the event of a bird strike by using adapted finite element computational models, Materials Today: Proceedings, V. 59, Part 3, 2022, pp. 1797-1803, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.381
2. Sierikova, O., Koloskov, V. Ye., Degtyarev, K., & Strelnikova, O. (2022). Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum, 1068*, 223–229. https://doi.org/10.4028/p-888232
3. K. Degtyarev, P. Glushich, V. I. Gnitko and E. Strelnikova (2015). Numerical Simulation of Free Liquid-Induced Vibrations in Elastic Shells International Journal of Modern Physics and Applications, V.1(4), pp. 159-168 https://api.semanticscholar.org/CorpusID:220725789
4. T Medvedovskaya, E Strelnikova, E Medvedyeva (2015) Free Hydroelastic Vibrations of Hydroturbine Head Covers International Journal of Engineering and Advanced Research Technology, V.1(1), pp/45-50. DOI: 10.13140/RG.2.1.3527.4961
5. Taranets O. M., Tkachenko V. A., Kondratyuk I. AT. (2017) Ways to increase the accuracy of determining target coordinates by artillery sound reconnaissance units. Collection of scientific papers of the Military Academy (Odessa). Odesa, Vol. 2(8). P. 74-81. [in Ukrainian] http://nbuv.gov.ua/UJRN/zbnpva_2017_2_13
6. Sergienko R. V., Yarovenko V. V. (2020). Ways to increase the accuracy of determining target coordinates by promising sound measurement complexes. Prospects for the development of weapons and military equipment of the ground forces: collection of abstracts of the additional international scientific and technical conference, Lviv, May 14-15, 2020. Lviv, P. 184. [in Ukrainian] DOI: 10.37701/dndivsovt.17.2023.13
7. Sergienko R. V., Shevchenko O. M. (2013) Ways to increase the reconnaissance zone by the automated sounding complex AZK-7 by changing the feature of the complex composition. Problematic issues of the development of weapons and military equipment of the Armed Forces of

Ukraine: theses of the IV scientific and technical conference, Kyiv, 2013. P. 201. [in Ukrainian] https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/303

8. Kochan R. V., Trembach B. R., Kochan O. V. Methodological error of target direction finding by the sound artillery reconnaissance system. Measuring technology and metrology. 2019. Vol. 80. Issue 3. P. 10-14 [in Ukrainian]. irbis-nbuv.gov.ua
9. Kochan R. V., Trembach B. R. (2016) Analysis of the error of measuring the angle of direction to the target by a distributed sound artillery reconnaissance system. Measuring Technique and Metrology. Issue 77. P. 177–182. [in Ukrainian] https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/jul/13917/vyp77vymir-tech-177-182.pdf
10. Tkachuk P. P., Krasyuk O. P., Sergienko R. V. (2012) Peculiarities of using a sound-metering complex when deployed at short distances with simulation. Military Technical Collection. Lviv, 2012. Issue 02 (07). P. 103- 105. [in Ukrainian] https://doi.org/10.33577/2312-4458.7.2012

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. V. Merculov, M. Kostin, G. Martynenko, N. Smetankina, V. Martynenko (2022), Improving the accuracy of the behaviour simulation of the material of the turbojet aircraft engine fan rotor blades in the event of a bird strike by using adapted finite element computational models, Materials Today: Proceedings, V. 59, Part 3, 2022, pp. 1797-1803, https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.381
2. Sierikova, O., Koloskov, V. Ye., Degtyarev, K., & Strelnikova, O. (2022). Improving the Mechanical Properties of Liquid Hydrocarbon Storage Tank Materials. *Materials Science Forum*, *1068*, 223–229. https://doi.org/10.4028/p-888232
3. K. Degtyarev, P. Glushich, V. I. Gnitko and E. Strelnikova (2015). Numerical Simulation of Free Liquid-Induced Vibrations in Elastic Shells International Journal of Modern Physics and Applications, V.1(4), pp. 159-168 https://api.semanticscholar.org/CorpusID:220725789
4. T Medvedovskaya, E Strelnikova, E Medvedyeva (2015) Free Hydroelastic Vibrations of Hydroturbine Head Covers International Journal of Engineering and Advanced Research Technology, V.1(1), pp/45-50. DOI: 10.13140/RG.2.1.3527.4961
5. Таранець О. М., Ткаченко В. А., Кондратюк І. О. (2017) Шляхи підвищення точності визначення координат цілей підрозділами звукової розвідки артилерії. *Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса).* Одеса, Вип. 2(8). С. 74-81. http://nbuv.gov.ua/UJRN/zbnpva_2017_2_13
6. Сергієнко Р. В., Яровенко В. В. (2020). Шляхи підвищення точності визначення координат цілі перспективними звукометричними комплексами. *Перспективи розвитку озброєння та військової техніки сухопутних військ* : зб. тез доп. міжнар. наук.-техн. конф., м. Львів, 14-15 травня 2020 р. Львів, С. 184. DOI: 10.37701/dndivsovt.17.2023.13
7. Сергієнко Р. В., Шевченко О. М. (2013) Шляхи збільшення зони ведення розвідки автоматизованим звукометричним комплексом АЗК-7 зміною ознаки складу комплексу. *Проблемні питання розвитку озброєння та військової техніки Збройних Сил України* : тези доп. IV наук.-техн. конф., м. Київ, , 2013. С. 201. https://dndivsovt.com/index.php/journal/article/view/303
8. Кочан Р. В., Трембач Б.Р., Кочан О.В. Методична похибка пеленгування цілі системою звукової артилерійської розвідки. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2019. Том 80. Вип.3. С. 10-14. irbis-nbuv.gov.ua
9. Кочан Р. В., Трембач Б.Р. (2016) Аналіз похибки вимірювання кута напряму на ціль розподіленою системою звукової артилерійської розвідки. *Вимірювальна техніка та метрологія*. Вип.77. С. 177–182. https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2018/jul/13917/vyp77vymir-tech-177-182.pdf
10. Ткачук П. П., Красюк О. П., Сергієнко Р. В. (2012) Особливості застосування звукометричного комплексу при розгортанні на скорочених віддалях з проведенням імітації. *Військово-технічний збірник*. Львів, 2012. Вип. 02 (07). С. 103- 105. https://doi.org/10.33577/2312-4458.7.2012

Яровенко Вадим Аспірант
Харківський національний університет радіоелектроніки
Проспект Науки, 14, Харків, 61166,
e-mail: vadym.yarovenko@nure.ua;
https://orcid.org/0009-0004-7116-2493

Підвищення точності визначення координат цілі в автоматизованій акустичній системі шляхом аналізу часових характеристик сигналу

Мета дослідження - проведення аналізу процесу часового дешифрування, дослідження впливу похибок топогеодезичної прив'язки на визначення координат цілі та відображення їх на значенні часового дешифрування.

Актуальність. Артилерійська звукова розвідка (АЗР) – одна з ключових складових контрбатарейної боротьби, оскільки забезпечує приховане, цілодобове виявлення та високоточне визначення координат вогневих позицій противника шляхом реєстрації та оброблення акустичних сигналів пострілів і вибухів. Однак практична ефективність традиційних звукометричних комплексів істотно обмежується нелінійним впливом просторово-часових градієнтів метеорологічних полів (температури та вітру) і похибками топогеодезичного забезпечення, що призводить до значних систематичних та випадкових зсувів фазових і часових характеристик сигналу й, відповідно, до деградації точності просторової прив'язки цілей.

Методи дослідження. У статті розроблено узагальнену математичну модель процесу акустичного пеленгування, у якій висотно-шарові профілі атмосфери описуються як кусково-сталі субмоделі стратифікованого середовища із раціонально апроксимованими градієнтами температури та горизонтальними складовими швидкостей вітру. Для підвищення стійкості дешифрування у середовищі з фоновими завадами запропоновано адаптивні часові вікна зі змінною аподизацією, що синхронізуються зі спектральною еволюцією пострільного імпульсу. На основі цієї моделі отримано аналітичні співвідношення для корекції фазових та часових зсувів, які інтегровано у модифікований алгоритм обчислення координат цілі штатного комплексу АЗК-7.

Результати. Числові експерименти, проведені для сценаріїв типової нестійкої стратифікації (інверсія, ізотермія, супер-адіабатичні градієнти) продемонстрували зниження середньоквадратичної помилки визначення координат. Запропонований підхід не потребує апаратної модернізації та може бути впроваджений у системне програмне забезпечення наявних звукометричних комплексів Збройних Сил України через оновлення модулів оброблення даних та балюстичного центру. Очікується, що це забезпечить підвищення ймовірності ураження ворожих батарей першими ж контрзалпами на 10-15 %, скорочення середнього часу реакції вогневих підрозділів на 30-40 % та зменшення витрат боєприпасів у передовій зоні.

Висновки. Встановлено залежність між значенням вікна часового дешифрування та похибкою у визначенні дирекційного кута цілі за результатами засічки одним з базних пунктів, створено алгоритм визначення та врахування величини цієї похибки. Окреслено перспективи подальших досліджень, зокрема автоматизоване врахування реального рельєфу місцевості за цифровими моделями висот і можливість інтеграції з безпілотними засобами радіоакустичного зондування для оперативного оновлення метеоданих.

Ключові слова: *звукова розвідка, автоматизований звукометричний комплекс, програмно-апаратний комплекс, акустична база, геометрична база, акустичний промінь, часове дешифрування*

.

Надійшла у першій редакції 03.03.2025, в останній - 05.04.2025.
The first version has been received on 03.03.2025, the final version - on 05.04.2025.

ВІСНИК ХАРКІВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
імені В.Н. Каразіна
серія **«Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління»**

Випуски даної серії розповсюджуються у академічних та наукових колах України та за її межами з метою оперативного висвітлення досліджень у таких актуальних галузях: математичне та комп'ютерне моделювання, обчислювальний експеримент, теорія і прикладні методи обробки інформації, захист інформації, програмно-апаратні системи інформаційного або управляючого призначення, застосування математичного моделювання та системного аналізу у високих, наукоємних технологіях, враховуючи технології створення програмної продукції. Приймаються роботи, що відносяться до напрямів фізико-математичних і технічних наук (бажаний об'єм 6-18 сторінок). Усі рукописи рецензуються.

Примітка. Протягом 2025-26 рр. редакційна колегія при інших рівних умовах надаватиме перевагу роботам, що представлені англійською мовою, якщо стаття отримала схвалення при рецензуванні.

Офіційний сайт **http://periodicals.karazin.ua/mia**
http://mia.univer.kharkov.ua
Email: journal-mia@karazin.ua

Bulletin of V.N. Karazin Kharkiv National University
series **«Mathematical modeling. Information technology. Automated control systems»**

This series are distributed in academic and scientific circles of Ukraine and abroad for the purpose of timely coverage of research in the following topical areas: mathematical and computer modeling, computational experiment, theory and applied methods of information processing, information protection, software and hardware systems of control and information management, applications of mathematical modeling and system analysis in high, science-intensive technologies, including technologies of software products creation. Articles belonging to the fields of physical, mathematical and technical sciences are accepted (recommended length 6-18 pages). All submissions are peer-reviewed.

Note. For the years 2025-26, all other conditions being equal, the Editorial Board will give preference to articles submitted in English and approved by the peer-review.

Official website **http://periodicals.karazin.ua/mia**
http://mia.univer.kharkov.ua
Email: journal-mia@karazin.ua

Наукове видання

Вісник Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна

Серія Математичне моделювання. Інформаційні технології. Автоматизовані системи управління

Випуск 65

Збірник наукових праць

Українською та англійською мовами

Комп'ютерне верстання О. О. Афанасьєва

Підписано до друку 30.11.2025 р.
Формат 60х84/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Ум. друк. арк. – 10,7.
Обл.– вид. арк. – 8,56.
Наклад 50 пр. Зам. № 30/2025
Безкоштовно

Видавець і виготовлювач
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК №3367 від 13.01.09

Видавництво Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
тел.: 705-24-32