

Міністерство освіти і науки України

---

---

# Системні технології

System technologies

---

6 (161) 2025

---

*Регіональний міжвузівський збірник наукових праць*

*Засновано у січні 1997 року.*

*У випуску:*

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

Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. –  
Випуск 6 (161). - Дніпро, 2025. – 245 с.  
ISSN 1562-9945 (Print).  
ISSN 2707-7977 (Online).

### **Редакційна колегія випуску:**

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

Прогресивні інформаційні  
технології та організація  
сучасного виробництва

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

Математичне  
та програмне забезпечення  
інтелектуальних систем

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

Системні технології обробки  
інформації  
та кібербезпека

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

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

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

## НЕЙРО-НЕЧІТКЕ ПРОГНОЗУВАННЯ САМОПОДІБНОГО ТРАФІКУ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ МЕРЕЖ ДЛЯ СИСТЕМ ВИЯВЛЕННЯ АТАК

*Анотація.* Запропоновано для прогнозування самоподібного трафіку інформаційно-комунікаційних мереж використовувати адаптивні фільтри-апроксиматори у вигляді адаптивних систем нечіткого висновку на основі алгоритмів Сугено-Такагі, Такагі-Сугено-Канга та Ванга-Менделя. Шляхом моделювання на основі експериментальних даних показана ефективність розв'язання задачі прогнозування мережевого трафіка із використанням глобальних методів оптимізації та нейро-нечітких фільтрів. Підтверджена адекватність отриманих результатів.

*Ключові слова:* виявлення атак, інформаційно-комунікаційна мережа, прогнозування, самоподібний трафік, адаптивна мережа нечіткого висновку, глобальна оптимізація.

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток інформаційних технологій та інформаційно-комунікаційних систем і мереж (ІКМ) викликає ряд безпрецедентних загроз зі сторони окремих осіб, організацій або країн, які прагнуть дестабілізувати суспільне життя, втручаючись в роботу критично важливих об'єктів інфраструктури. Тому актуальним рішенням зазначеної проблеми є використання засобів моніторингу, здатних аналізувати трафік мережі в режимі реального часу. До таких засобів відносяться системи виявлення та запобігання атак (СВА) [1-4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основним завданням СВА є оперативне виявлення вторгнень та запровадження ефективного захисного сценарію щодо припинення факту порушення конфіденційності, доступності та цілісності інформаційних ресурсів та сервісів [1-4].

Сучасні СВА прийнято розділяти на два типи: спрямовані на пошук зловживань та на виявлення аномалій у системі. Виявлення зловживань ґрунтується на формуванні шаблонів вторгнень, що не є ефективним при детектуванні невідомих атак. Для реєстрації невідомих атак в ІКМ використовують системи виявлення аномалій, в яких певні дії, що є відмінними від поведінки в нормальному стані, ідентифікуються як аномальні. При виявленні мережевих аномалій даними для аналізу є мережевий трафік. Створений набір ознак (характеристики трафіку) порівнюється з набором ознак нормальної діяльності системи або конкретних користувачів, і якщо спостерігається суттєва розбіжність, фіксується мережева аномалія. При цьому, набір ознак нормальної діяльності системи або конкретних користувачів, СВА на основі аномалій повинні накопичити перед поча-

тком використання, і постійно оновлювати його із урахуванням поточного спостережуваного профілю мережевої активності [5-8].

Трафік в ІКМ є нелінійним стохастичним процесом з властивостями самоподоби та з хаотичною і фрактальною динамікою. Крім того, встановлено, що агрегований трафік від різних джерел на малих часових масштабах проявляє мультифрактальний характер [9, 10].

Оцінка характеристик мережевого трафіку необхідна для побудови його адекватної моделі, що дозволяє сформулювати еталонну модель (шаблон) «нормального» трафіку і за нею виявляти аномалії трафіку в СВА. При цьому прогнозування мережевого трафіку, яке дозволяє підвищити оперативність виявлення атак, доцільно проводити із використанням адаптивних фільтрів-апроксиматорів (АФА), побудованих на основі систем штучного інтелекту (нейронних мереж (НМ), систем з нечіткою логікою) [9].

Для усунення недоліків НМ і систем з нечіткою логікою запропоновані гібридні мережі, в яких висновки робляться на основі апарату нечіткої логіки, а відповідні функції належності підлаштовуються із використанням алгоритмів навчання НМ. Такі системи не тільки використовують апріорну інформацію, але й можуть набувати нових знань, а для користувача є логічно прозорими [3, 9, 11-15].

У роботі [11] запропоновано методику прогнозування трафіку в ІКМ, яка дозволяє підвищити ймовірність визначення вторгнень для СВА за рахунок зниження похибок інтелектуальних прогнозуючих моделей самоподібного трафіка. При цьому, у роботі [11] досліджується один тип АФА на основі гібридної мережі для прогнозування мережевого трафіку. У роботах [3, 9, 12-14] наведено використання гібридних мереж для вирішення різних завдань, але відсутні роботи, де виконується дослідження використання різних типів гібридних мереж із налаштуванням їх параметрів оптимізаційними методами.

Таким чином, невирішеною задачею є обґрунтування типу нейро-нечіткого АФА для прогнозування самоподібного трафіку ІКМ для виявлення його аномалій в реальному масштабі часу при використанні в СВА.

**Мета роботи** – дослідження гібридних нейро-нечітких мереж для прогнозування самоподібного трафіку ІКМ, із налаштуванням їх параметрів за допомогою методів глобальної оптимізації, які б дозволяли їх використання в СВА для виявлення мережевих аномалій.

**Викладення основного матеріалу дослідження. Прогнозування на основі гібридних нейро-нечітких мереж.** Гібридна нейро-нечітка мережа – це мережа з чіткими сигналами, вагами і активаційною функцією, але з об'єднанням сигналів і ваг з використанням  $t$ -норми,  $t$ -конорми або деяких інших безперервних операцій. Входи, виходи і ваги гібридної мережі – речові числа, що належать відрізьку  $[0,1]$  [9].

До гібридних мереж належить Anfis (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System) – адаптивна мережа нечіткого висновку. Такі мережі дозволяють вхідним сигналам за допомогою нечітких перетворень (алгоритмів Сугено-Такагі, Такагі-Сугено-Канга, Ванга-Менделя) та апроксимації зіставити вихідний сигнал.

Алгоритм Сугено-Такагі використовує наступну модель нечіткого правила [3, 9]:

$R_r$ : ЯКЩО  $x_1$  це  $A_{1r}$ , ... І  $x_n$  це  $A_{nr}$ , ТО  $y=f(X)$ ,

де  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – входи мережі;  $y$  – вихід мережі;  $f(X)$  – деяка чітка функція (наприклад, поліном першого порядку);  $A_{ir}$  – нечіткий терм з функцією належності  $\mu_r(x_i)$ , що застосовується для лінгвістичної оцінки змінної  $x_i$  у правилі  $r$  ( $r = \overline{1, m}, i = \overline{1, n}$ ).

Мережа Anfis на основі алгоритму Сугено-Такагі є п'ятишаровою штучною НМ прямого розповсюдження сигналу. Призначення шарів наступне: перший шар – терми вхідних змінних; другий – антецеденти (посилки) нечітких правил; третій – нормалізація ступенів виконання правил; четвертий шар – укладення правил; п'ятий – агрегування результату, отриманого за різними правилами.

Входи мережі в окремий шар не виділяються. Структуру мережі Anfis на основі алгоритму Сугено-Такагі представлено на рис. 1.

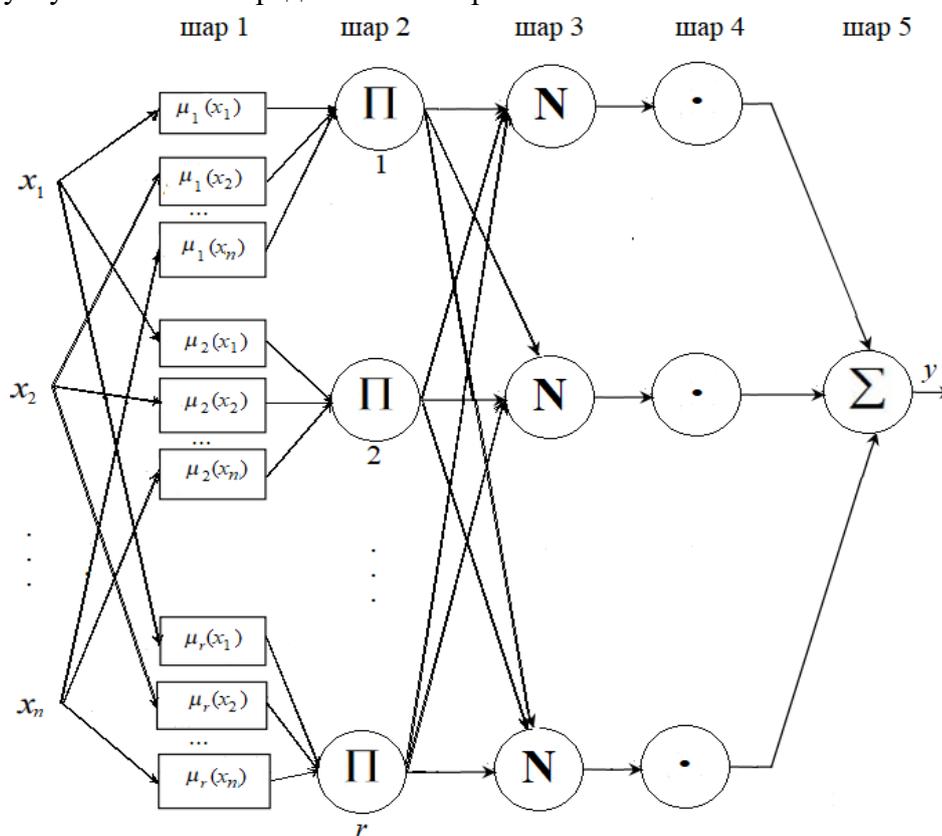


Рисунок 1 - Структура адаптивної мережі нечіткого висновку на основі алгоритму Сугено-Такагі

*Шар 1.* Кожен вузол першого шару представляє один терм з функцією належності. Входи мережі  $x_1, x_2, \dots, x_n$  з'єднані тільки зі своїми термами. Кількість вузлів цього шару дорівнює сумі потужностей терм-множин вхідних змінних. Виходом вузла є ступінь належності значення вхідної змінної відповідного нечіткого терму:

$$\mu_r(x_i) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x_i - c}{a} \right|^{2b}} \quad (1)$$

де  $a$ ,  $b$  і  $c$  – параметри функції належності, які налаштовуються.

*Шар 2.* Кількість вузлів цього шару дорівнює  $m$ . Кожен вузол шару відповідає одному нечіткому правилу. Вузол другого шару з'єднаний з тими вузлами першого шару, які формують антецеденти відповідного правила. Отже, кожен вузол цього шару може приймати від 1 до  $n$  вхідних сигналів. Виходом вузла  $\tau_r$  ( $r = \overline{1, m}$ ) є ступінь виконання правила, яка розраховується як добуток вхідних сигналів.

*Шар 3.* Кількість вузлів цього шару також дорівнює  $m$ . Кожен вузол розраховує відносну ступінь виконання нечіткого правила:

$$\tau_r^* = \frac{\tau_r}{\sum_{j=1, m} \tau_j} \quad (2)$$

*Шар 4.* Кількість вузлів цього шару також дорівнює  $m$ . Кожен вузол з'єднаний з одним вузлом третього шару, а також із усіма входами мережі (на рис. 1 зв'язки зі входами не показані). Вузол четвертого шару розраховує внесок одного нечіткого правила у вихід мережі:

$$y_r = \tau_r^* (b_{0,r} + b_{1,r}x_1 + \dots + b_{n,r}x_n), \quad (3)$$

де  $b_{q,r}$  – коефіцієнти у висновку  $r$ -правила ( $r = \overline{1, m}$ ,  $q = \overline{0, n}$ ).

*Шар 5.* Єдиний вузол цього шару підсумовує вклади усіх правил:

$$y = y_1 + \dots + y_r + \dots + y_m. \quad (4)$$

Типові процедури навчання НМ можуть бути застосовані для налаштування мережі Anfis на основі алгоритму Сугено-Такагі, оскільки в ній використовуються тільки функції, які диференціюються. Зазвичай застосовується комбінація градієнтного спуску у вигляді алгоритму зворотного поширення похибки і методу найменших квадратів. Алгоритм зворотного поширення похибки налаштовує параметри антецедентів правил, тобто функцій належності. Метод найменших квадратів оцінює коефіцієнти висновків правил, оскільки вони лінійно пов'язані із виходом мережі.

Кожна ітерація процедури налаштування виконується у два етапи. На першому етапі на входи подається навчальна вибірка й по розбіжності між бажаною і дійсною поведінкою мережі ітераційним методом найменших квадратів знаходяться оптимальні параметри вузлів шару 4. На другому етапі залишкова розбіжність передається з виходу мережі на входи і методом зворотного поширення похибки модифікуються параметри вузлів шару 1. При цьому знайдені на першому етапі коефіцієнти висновків правил не змінюються. Ітераційна процедура налаштування триває доки розбіжність перевищує заздалегідь встановлене значення. Для налаштування функцій належності поряд з методом зворотного поширення похибки можуть використовуватись й інші алгоритми оптимізації (метод Левенберга-Марквардта та інші).

Алгоритм Такагі-Сугено-Канга використовує наступну модель нечіткого правила [12, 13]:

$P_i$ : ЯКЩО  $x_1$  це  $A_{i1}$ , I ... I  $x_j$  це  $A_{ij}$  I ... I  $x_m$  це  $A_{im}$  ТО  $y = c_{i0} + \sum_{j=1}^m c_{ij}x_j$ ,

де  $i=1, \dots, m$ ;  $j=1, \dots, n$ ;  $A_{ij}$  – значення лінгвістичної змінної  $x_j$  для правила  $P_i$  з функцією належності Гауса:

$$\mu_{A_{ij}}(x_j) = \exp\left(-0,5\left(\frac{x_j - a_{ij}}{b_{ij}}\right)^2\right), \quad (5)$$

де  $x_j$  – входи мережі;  $a_{ij}, b_{ij}$  – параметри функції належності, що налаштовуються.

Функціональна залежність для отримання вихідної змінної величини після дефазифікації, що здійснюється методом центроїду, має вигляд:

$$y' = \frac{\sum_i^n \left( \left( c_{i0} + \sum_{j=1}^m c_{ij}x_j \right) \prod_j^m \mu_{A_{ij}}(x'_j) \right)}{\sum_{i=1}^n \prod_j^m \mu_{A_{ij}}(x'_j)} = \frac{\sum_i^n \left( \left( c_{i0} + \sum_{j=1}^m c_{ij}x_j \right) \prod_j^m \exp\left[-\left(\frac{x'_j - a_{ij}}{b_{ij}}\right)^2\right] \right)}{\sum_{i=1}^n \prod_j^m \exp\left[-\left(\frac{x'_j - a_{ij}}{b_{ij}}\right)^2\right]} \quad (6)$$

Вираз (6) лежить в основі мережі Anfis із застосуванням алгоритму Такагі-Сугено-Канга, яка включає п'ять шарів (рис. 2).

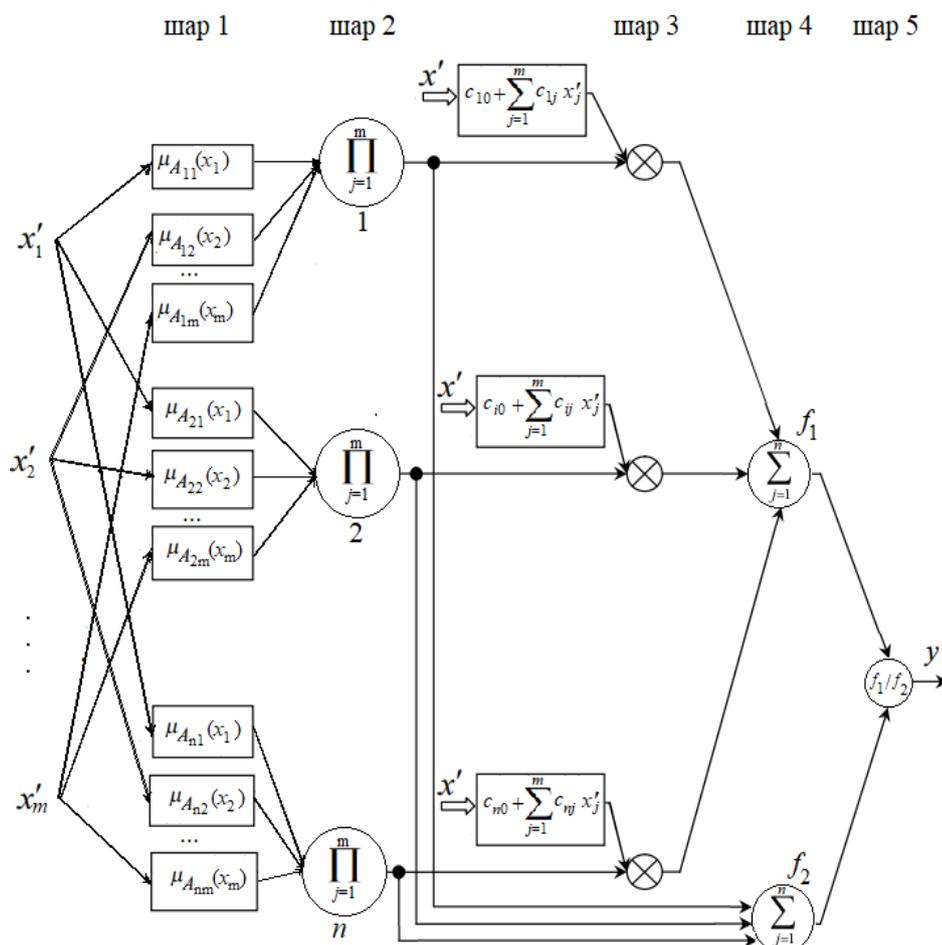


Рисунок 2 - Структура адаптивної мережі нечіткого висновку на основі алгоритму Такагі-Сугено-Канга

*Шар 1.* Складається з елементів, які виконують фазифікацію вхідних чітких змінних  $x'_j$  ( $j=1, \dots, n$ ). Елементи цього шару обчислюють значення ступенів належності гаусівських функцій належності  $\mu_{A_{ij}}[x'_j]$ , з параметрами  $a_{ij}$  і  $b_{ij}$ , які підлягають адаптації в процесі навчання мережі.

*Шар 2.* Число елементів цього шару дорівнює кількості правил в базі. Виконує нечітку імплікацію (нечіткий добуток) ступенів належності відповідних правил.

*Шар 3.* У цьому шарі розраховується значення функцій вихідного сигналу  $\left( c_{j0} + \sum_{j=1}^m c_{ij} x'_j \right)$ , які множаться на вагові коефіцієнти, що отримані попереднім шаром. При чому параметри  $c_{i0}$  та  $c_{ij}$ , які визначають функції висновків правил, підлягають адаптації в процесі навчання мережі.

*Шар 4.* Містить два елементи-суматори. Перший елемент агрегує висновки правил попереднього шару, другий – проводить допоміжні обчислення для подальшої дефазифікації.

*Шар 5.* Складається з єдиного нормалізуючого елемента, який виконує дефазифікацію результату.

В мережі Anfis на основі алгоритму Такагі-Сугено-Канга процес навчання відбувається в два етапи. Спочатку шляхом розв'язання системи лінійних рівнянь розраховуються параметри  $c_{i0}$  та  $c_{ij}$  лінійних функцій із висновків правил за умови фіксованих значень параметрів  $a_{ij}$  та  $b_{ij}$ . На другому етапі визначені параметри  $c_{ij}$  фіксуються та розраховуються фактичні вихідні сигнали мережі для всіх прикладів, після чого уточнюються нелінійні параметри  $a_{ij}$  і  $b_{ij}$  гаусівських функцій належності фазифікатора (наприклад, за алгоритмом Уїдроу-Хоффа). Далі процес адаптації параметрів запускається знову доти, доки настане повторюваність результатів. Цей алгоритм називають гібридним, його особливість полягає у розподілі етапів процесу навчання. Також дана мережа може бути навчена із використанням алгоритму зворотного поширення похибки.

Мережу Anfis на основі алгоритму Ванга-Менделя можна розглядати як окремий випадок попередньої мережі. У мережі Такагі-Сугено-Канга результатом є поліном  $c_{i0} + \sum_{j=1}^m c_{ij} x'_j$ , тоді як у мережі Ванга-Менделя вихідна змінна є константною  $c_i$ , яку можна розглядати як поліном нульового порядку.

Мережа Anfis із застосуванням алгоритму Ванга-Менделя заснована на нечітких правилах [14, 15]:

$D_i$ : ЯКЩО  $x_1$  це  $A_{i1}$ , І ... І  $x_j$  це  $A_{ij}$ , І ... І  $x_m$  це  $A_{im}$  ТО  $y=B_i$ ,

де  $i=1, \dots, m$ ;  $j=1, \dots, n$ .

Нечіткий висновок для даної моделі має наступний вигляд:

$$\mu_{B_i}(y) = \mu_{B_i}[y] \prod_{j=1}^m \mu_{A_{ij}}(x'_j) \quad (7)$$

Оскільки акумулювання активізованих висновків правил не проводиться, методом дефазифікації є метод середнього центру, а функції належності всіх нечітких множин є функціями Гауса, то вихідна змінна визначається наступним чином:

$$y' = \frac{\sum_{i=1}^n \left( \arg \max_y \left( \exp \left[ -\frac{y - c_i}{d_i} \right] \right) \right) \prod_{j=1}^m \exp \left[ -\frac{x'_j - a_{ij}}{b_{ij}} \right]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \exp \left[ -\frac{x'_j - a_{ij}}{b_{ij}} \right]} = \frac{\sum_{i=1}^n c_i \prod_{j=1}^m \exp \left[ -\frac{x'_j - a_{ij}}{b_{ij}} \right]}{\sum_{i=1}^n \prod_{j=1}^m \exp \left[ -\frac{x'_j - a_{ij}}{b_{ij}} \right]}, \quad (8)$$

де  $c_i, d_i$  – відповідно, центри та ширина гаусівських функцій, що представляють функції належності нечітких множин  $B_i$  висновків правил;  $a_{ij}, b_{ij}$  – відповідно центри і ширина гаусівських функцій, що є функціями належності нечітких множин  $A_{ij}$  предпосилок правил.

На рис. 3 представлена структура мережі Anfis на основі алгоритму Ванга-Менделя, елементи шарів якої реалізують відповідні компоненти виразу (8).

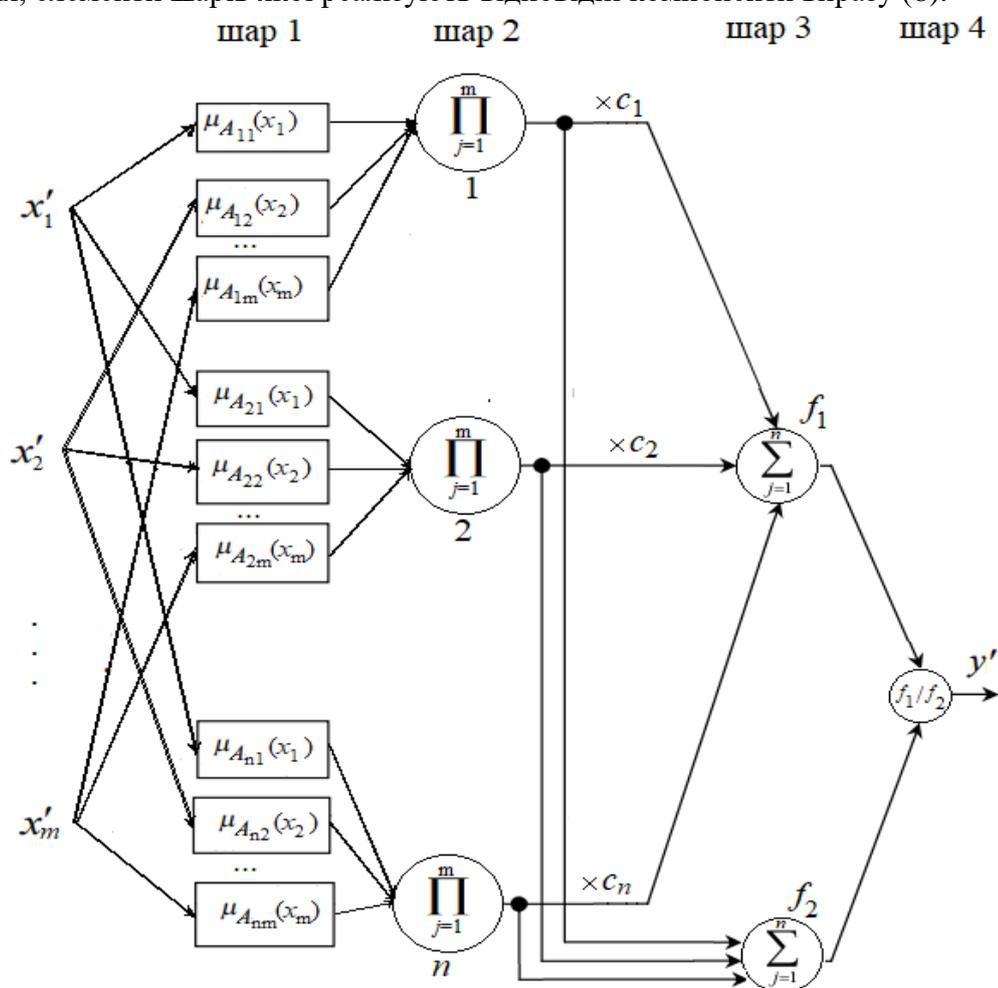


Рисунок 3 - Структура адаптивної мережі нечіткого висновку на основі алгоритму Ванга-Менделя

*Шар 1.* Складається з елементів, які виконують фазифікацію вхідних чітких змінних  $x'_j$  ( $j=1, \dots, n$ ) та обчислюють значення гаусівських функцій належності  $\mu_{A_{ij}}[x'_j]$ .

Шар 2. Число елементів цього шару дорівнює кількості правил в базі. Здійснює агрегування ступенів належності передумов відповідних правил.

Шар 3. Перший елемент цього шару служить для активізації висновків правил ( $c_i$ ) відповідно до значень агрегованих у попередньому шарі ступенів належності передумов правил. Другий елемент проводить допоміжні обчислення для подальшої дефазифікації.

Шар 4. Складається з одного елемента, який виконує дефазифікацію результату.

Алгоритм навчання мережі Anfis на основі алгоритму Ванга-Менделя відбувається в два етапи. На першому етапі при фіксованих значеннях параметрів першого шару ( $a_{ij}$  і  $b_{ij}$ ) налаштовуються лінійні параметри елементів третього шару  $c_i$ . Ця процедура ітераційно повторюється і вважається завершеною якщо значення функції похибки за кожним прикладом навчальної вибірки не перебільшує деякого встановленого порога, або оцінка середньої сумарної похибки нечіткої продукційної моделі із урахуванням всіх прикладів навчальної вибірки не перебільшує деякого порога, або похибка застabilізувалась на певному значенні. На другому етапі налаштовуються параметри нелінійної функції належності в елементах першого шару  $a_{ij}$  та  $b_{ij}$ . Це також ітераційна процедура, умови завершення якої аналогічні умовам завершення першого етапу. У разі невиконання першої чи другої умов завершення процес ітераційно повторюється, починаючи з коригування  $c_i$  доки мережа не буде коректно навчена. Також замість вищеведеного адаптивного алгоритму, мережа Ванга-Менделя може бути навчена за допомогою алгоритму найскорішого спуску з моментами.

Оскільки задача обґрунтування типу нейро-нечіткого АФА із налаштуванням його параметрів є полімодальною, то це вимагає використання методів глобальної оптимізації, серед яких найбільш ефективними є пошукові методи. У них алгоритм пошуку оптимального рішення пов'язує наступні один за одним рішення  $\Psi_s(j+1) = F[\Psi_s(j)]$ , де  $F$  – алгоритм пошуку, який показує які операції слід зробити на кроці  $j$  при рішенні  $\Psi_s(j)$ , щоб отримати нове рішення  $\Psi_s(j+1) \succ \Psi_s(j)$ . Тут знак переваги  $\succ$  при мінімізації функціоналу має сенс:

$$C[\Psi_s(j+1)] < C[\Psi_s(j)]. \quad (9)$$

В алгоритмах прямого випадкового пошуку (ПВП) задаються напрямки пошуку і визначаються значення функціоналу  $C$  в точках  $\Psi_s(j) \pm \gamma\zeta$ . Рішення полягає у виборі кроку в напрямку зменшення цього функціоналу:

$$\Psi_s(j+1) = \Psi_s(j) - \omega\zeta \{C[\Psi_s(j) + \gamma\zeta] - C[\Psi_s(j) - \gamma\zeta]\}, \quad (10)$$

де  $\omega, \zeta, \gamma$  – параметри, що визначають сфери прийняття рішення ( $\omega$ ), збору інформації ( $\gamma$ ) та одиничний випадковий напрям ( $\zeta$ ). У загальному випадку параметри в (10) можуть змінюватися (адаптуватися) до процедури пошуку і виду гіперповерхні прийнятого функціоналу.

Розвитком методу ПВП є метод імітації відпалу (МІВ), який відображає поведінку розплавленого матеріалу при затвердінні із застосуванням процедури керованого охолодження (відпалу). У процесі відпалу кристалізація розплаву супроводжується глоба-

льним зменшенням його енергії, однак допускається її зростання на деякий час. Завдяки цьому можливий вихід з пасток локальних мінімумів енергії, що виникають при реалізації процесу. В алгоритмах МІВ задаються напрямки пошуку і визначаються значення функціоналу  $C$  в точках  $\Psi_s(j) \pm \nu\tau$ . Рішення полягає у виборі кроку в напрямку зменшення цього функціоналу:

$$\Psi_s(j+1) = \Psi_s(j) - \omega\nu\{C[\Psi_s(j) + \nu\tau] - C[\Psi_s(j) - \nu\tau]\}, \quad (11)$$

де  $\omega, \nu, \tau$  – параметри, що визначають сфери прийняття рішення ( $\omega$ ), зміну поточного рішення ( $\nu$ ) і зменшення температури ( $\tau$ ).

Багатокритеріальна оптимізація (БО) заснована на знаходженні рішення, одночасно оптимізуючого більш ніж одну функцію. У цьому випадку шукається певний компроміс, в ролі якого виступає рішення, оптимальне в сенсі Парето. При БО, що використовує генетичні алгоритми (ГА) вибирається не одна хромосома, що представляє собою оптимальне рішення в звичайному сенсі, а безліч хромосом, оптимальних в сенсі Парето. Користувач має можливість вибрати оптимальне рішення з цієї безлічі:

$$k \cdot \Psi_s(j+1) = k \cdot (\Psi_s(j) + \delta\Psi_s(j)), \quad (12)$$

де  $k \geq 2$  – число розглянутих критеріїв.

**Моделювання процесу прогнозування мережевого трафіку** було проведено в середовищі Matlab / Simulink за допомогою стандартних та розроблених програм.

Як експериментальні дані було взято трафік, що передається через мережу Інтернет [17]. Дані являють собою залежність розміру Ethernet кадрів в байтах від часу. Для їх нормування по часовій осі була проведена процедура агрегації з кроком 5 с.

Глибина прогнозу була прийнята у 4 такти, а глибина пам'яті за різними входами від 1 до 4.

Як глобальні методи оптимізації застосовувались БО, ПВП і МІВ. Метод БО використовував ГА для знаходження безлічі оптимальних за Парето рішень. ПВП мав адаптивний крок пошуку та повний пошук навколо поточної ітерації, МІВ – обмежену область перевідпалу. Кількість ітерацій для ПВП і МІВ (для БО поколінь) обмежувалося на рівні 100, а розмір простору пошуку для ПВП (для БО розмір популяції, для МІВ розмір області перевідпалу) – 30.

Як критерій глобальної оптимізації використовувався критерій незміщеності (мінімуму зсуву), який не чутливий до рівня шуму у вхідних даних і при збільшенні завад їх мінімум не зміщується в область простіших моделей [16]:

$$C_{зм} = \frac{\|\hat{Y}_A[m+n] - \hat{Y}_B[m+n]\|}{\|Y^*[m+n]\|}, \quad (13)$$

де  $\hat{Y}_A[m+n]$  і  $\hat{Y}_B[m+n]$  – виходи моделей, які навчені на вибірках  $A$  і  $B$ , відповідно.

Як критерій параметричної оптимізації використовувався критерій регулярності, що обчислюється на перевірочній вибірці [16]:

$$C_{pez} = \frac{\|Y_B^*[m+n] - \hat{Y}_B[m+n]\|}{\|Y_B^*[m+n]\|}, \quad (14)$$

де  $m$  – глибина пам'яті,  $n$  – глибина прогнозу.

Для побудови АФА використовувалась структура Гамерштейна-Вінера [11].

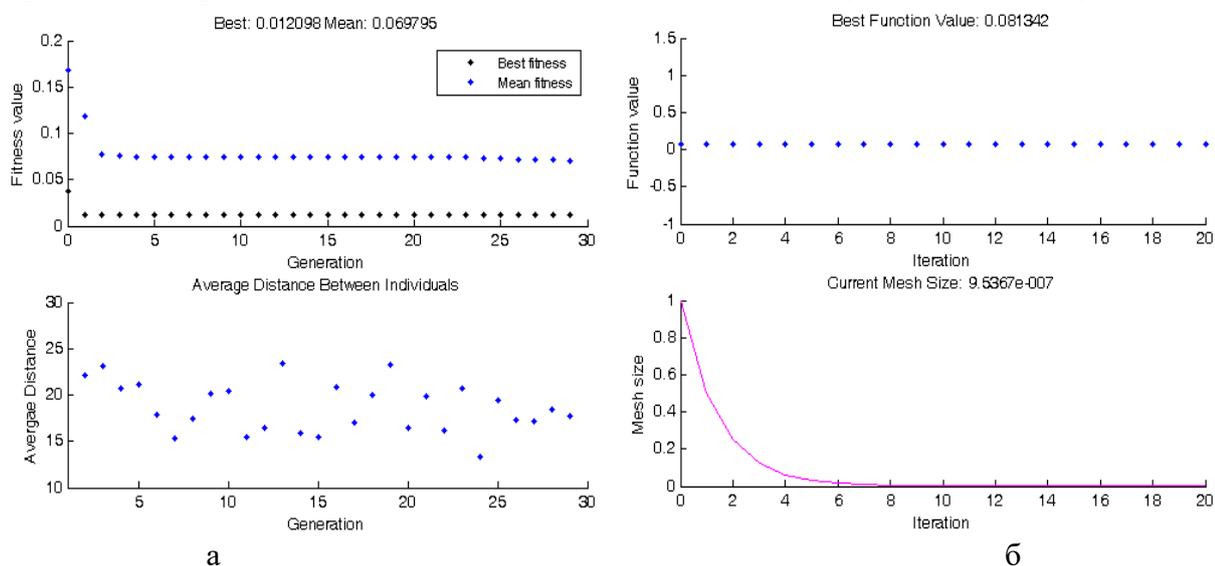
При глобальній оптимізації варіювалися наступні параметри АФА:

- тип АФА (базисної функції) – Anfis на основі алгоритму Сугено-Такагі, Такагі-Сугено-Канга та Ванга-Менделя;

- метод параметричної оптимізації (функція навчання мереж Anfis).

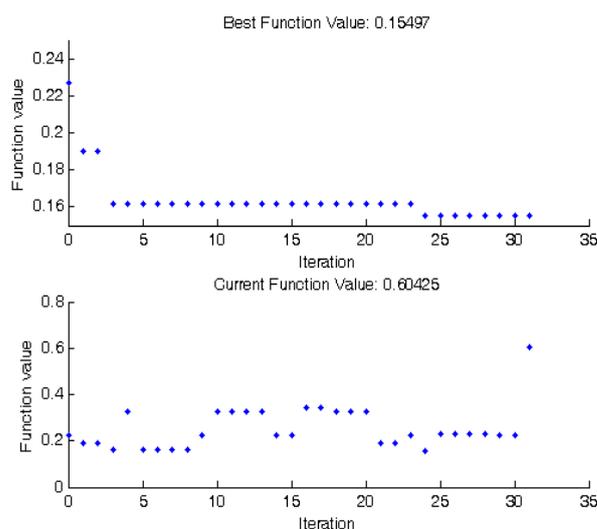
Результати глобальної оптимізації для знаходження оптимальної структури (типу) та параметрів АФА Anfis наведені на рис. 4.

В результаті моделювання (див. рис. 4) встановлено, що ПВП і БО мають найкращу швидкість збіжності (ПВП виходить в область оптимальних рішень на перших ітераціях, БО – на перших поколіннях, МІВ – після 20 ітерацій). Алгоритм МІВ виявив найкращу швидкодію (2,3 с на ітерацію при 8,2 с на ітерацію в ПВП і 20,9 с на покоління в БО). При цьому алгоритм БО виявив найкращу збіжність (значення критерію (13) при його використанні склали 0,0121, на відміну від 0,0813 при ПВП і 0,155 при МІВ).



a

б



в

Рисунок 4 - Результати глобальної оптимізації структури та параметрів АФА для прогнозування трафіку за допомогою: а – БО, б – ПВП, в – МІВ

Результат прогнозування мережевого трафіку наведено на рис. 5.

Встановлено, що мінімуму критерію регулярності відповідають АФА Anfis на основі алгоритму Такагі-Сугено-Канга, яка навчена гібридним алгоритмом. Значення критерію параметричної оптимізації (14) склало 0,0457.

Адекватність отриманих моделей мережевого трафіку експериментальним даним була перевірена і підтверджена за непараметричним критерієм знаків з рівнем значущості 0,01.

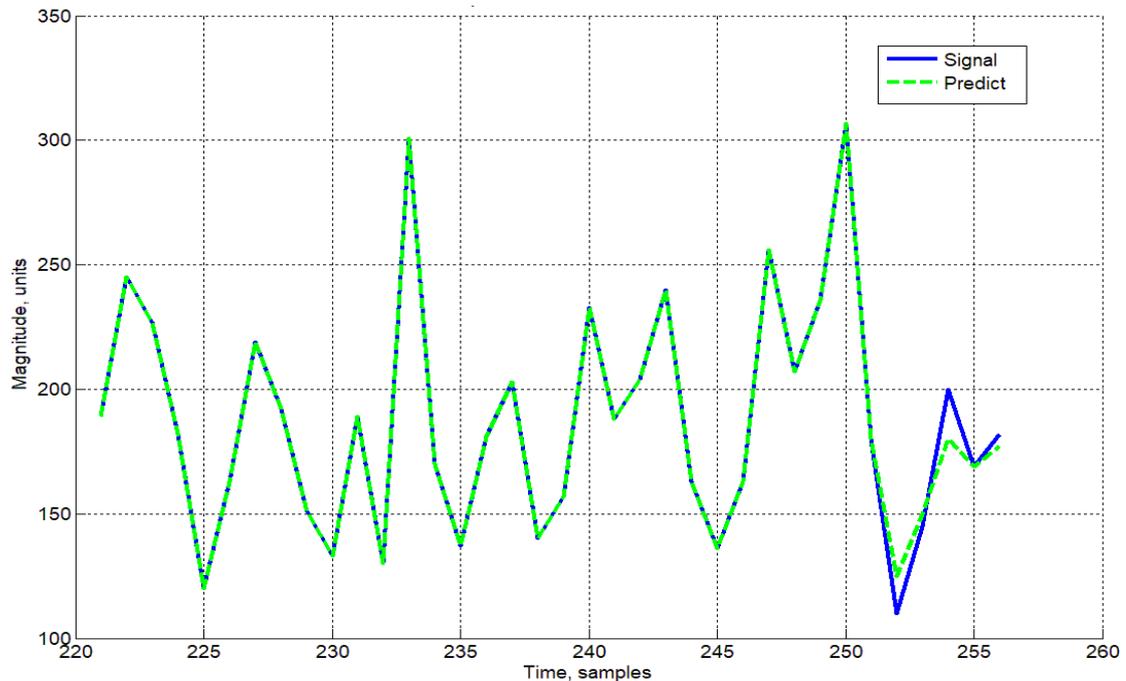


Рисунок 5 - Результат прогнозування мережевого трафіку

**Висновки.** Запропоновано для прогнозування самоподібного трафіку в інформаційно-комунікаційних мережах використовувати нейро-нечіткі адаптивні фільтри-апроксиматори у вигляді мереж Anfis на основі алгоритмів Сугено-Такагі, Такагі-Сугено-Канга та Ванга-Менделя. Для оптимізації цих фільтрів під реальні процеси виконана ідентифікація їх параметрів за критерієм точності на навчальній і перевіірочній послідовностях.

Шляхом моделювання на основі експериментальних даних показана ефективність розв'язання задачі прогнозування мережевого трафіка із використанням глобальних методів оптимізації та інтелектуальних базисних функцій (адаптивних мереж нечіткого висновку). Перевірена та підтверджена адекватність отриманих моделей самоподібного трафіку експериментальним даним.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на обґрунтування та дослідження інформативності характеристик і моделей мережевого трафіку та ефективності критеріїв та методів розпізнавання атак.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Толюпа С. Засоби виявлення кібернетичних атак на інформаційні системи / С. Толюпа, Н. Лукова-Чуйко, Я. Шестак // Інфокомунікаційні технології та електронна інженерія. – 2021. – № 2(2). – С. 19–31.
2. Проблеми захисту критично важливих об'єктів інфраструктури / Н. Лукова-Чуйко, В. Наконечний, С. Толюпа, Р. Зюбіна // Безпека інформаційних систем і технологій. – 2020. – № 1(2). – С. 31-39.
3. Толюпа С. Нейро-нечітка система виявлення вторгнень у інформаційну мережу критичної інфраструктури / С. Толюпа, А. Кулько // Кібербезпека: освіта, наука, техніка. – 2025. – 3(27). – С. 233-247.
4. Носенко К.М. Огляд систем виявлення атак в мережевому трафіку / К.М. Носенко, О.І. Півторак, Т.А. Ліхоузова // Адаптивні системи автоматичного управління. – 2014. – № 1(24). – С. 67-75.
5. Довбешко С.В. Застосування методів інтелектуального аналізу даних для побудови систем виявлення атак / С.В. Довбешко, С.В. Толюпа, Я.В. Шестак // Сучасний захист інформації. – 2019. – №1(37). – С. 6-15.
6. Лазаренко С.В. Особливості функціонування систем виявлення атак на автоматизовані системи / С.В. Лазаренко // Сучасний захист інформації. – 2015. – №1. – С. 33-40.
7. Гулак Г.М. Модель системи виявлення вторгнень з використанням двоступеневого критерію виявлення мережевих аномалій. / Г.М. Гулак, В.В. Семко, П.М. Складанний // Сучасний захист інформації. – 2015. – №4. – С. 81-85.
8. Лукова-Чуйко Н.В. Методи виявлення вторгнень у сучасних системах IDS / Н.В. Лукова-Чуйко, С.В. Толюпа, І.І. Пархоменко // Безпека інформаційних систем і технологій. – 2021. – № 1(5). – С. 19-26.
9. Корнієнко В.І. Інтелектуальне моделювання нелінійних динамічних процесів в системах керування, кібербезпеки, телекомунікацій: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О.В. Герасіна; за заг. ред. В.І. Корнієнка ; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». – Дніпро : НТУ «ДП», 2020. – 536 с.
10. Crovella M.E., Bestavros A. Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes. IEEE Transactions on Networking. 1997. Vol. 5. № 6. P. 835-846.
11. Герасіна О.В. Методика інтелектуальної ідентифікації та прогнозування трафіку в інформаційних телекомунікаційних мережах / О.В. Герасіна // Системи обробки інформації. – 2018. – № 1(152). – С. 94-99.
12. Modelling Intelligent System for the Estimation of Technical State of Construction Structures / S. Terenchuk, A. Pashko, B. Yeremenko, S. Kartavykh, N. Ershova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – 3(2 (93)). – P.47-53.
13. Кондратенко Н.Р. Основи нейронних мереж. Теорія та практика / Н.Р. Кондратенко, С.М. Куземко. - Вінниця: ВНТУ, 2006. – 104 с.
14. Vladov S. A neuro-fuzzy expert system for the control and diagnostics of helicopters aircraft engines technical state. / S. Vladov, Y. Shmelov, M. Petchenko // ICT in Education, Re-

search and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer: Proceedings of the 17th International Conference. – 2021. – P. 40-52.

15. Wang L.X. Generating fuzzy rules by learning from examples / L.X. Wang, J.M. Mendel // IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics. – 1992. – Vol. 22 (6). – P. 1414-1427.

16. Ivakhnenko A.G. Inductive learning algorithms for complex systems modeling / A.G. Ivakhnenko, H.R. Madala – London, Tokyo: CRC Press, 1994. – 384 p.

17. Traffic Archive. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ita.ee.lbl.gov>.

#### REFERENCES

1. Toliupa, S., Lukova-Chuiko, N., & Shestak, Ya. (2021). Zasoby vyivlennia kibernetichnykh atak na informatsiini systemy [Means of detecting cyber attacks on information systems]. Infokomunikatsiini tekhnologii ta elektronna inzheneriia, 2(2), 19–31 [in Ukrainian].
2. Lukova-Chuiko, N., Nakonechnyi, V., Toliupa, S., & Ziubina, R. (2020). Problemy zachystu krytychno vazhlyvykh ob'ektiv infrastruktury [Problems of protection of critical infrastructure facilities]. Bezpeka informatsiinykh system i tekhnologii, 1(2), 31-39 [in Ukrainian].
3. Toliupa, S., & Kulko, A. (2025). Neuro-nechitka systema vyivlennia vtornhen u informatsiinu merezhu krytychnoi infrastruktury [Neuro-fuzzy system for detecting intrusions into the information network of critical infrastructure]. Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika, 3(27), 233-247 [in Ukrainian].
4. Nosenko, K.M., Pivtorak, O.I., & Lichouzova, T.A. (2014). Ohliad system vyivlennia atak v merezhevomu trafiku [Overview of network traffic attack detection systems]. Adaptivni systemy avtomatychnoho upravlinnia, 1(24), 67-75 [in Ukrainian].
5. Dovbeshko, S.V., Toliupa, S.V., & Shestak, Ya.V. (2019). Zastosuvannia metodiv intelektualnogo analizu danykh dlia pobudovy system vyivlennia atak [Application of data mining methods to build attack detection systems]. Suchasnyi zakhyst informatsii, 1(37), 6-15 [in Ukrainian].
6. Lazarenko, S.V. (2015). Osoblyvosti funktsionuvannia system vyivlennia atak na avtomatyzovani systemy [Features of functioning of systems of detection of attacks on automated systems]. Suchasnyi zakhyst informatsii, 1, 33-40 [in Ukrainian].
7. Hulak, H.M., Semko, V.V., & Skladannyi, P.M. (2015). Model systemy vyivlennia vtornhen z vykorystanniam dvostupenevoho kryteriiu vyivlennia merezhevykh anomalii [Model of the system for detecting intrusion based on the two-stage criterion for detecting fencing anomalies]. Suchasnyi zakhyst informatsii, 4, 81-85 [in Ukrainian].
8. Lukova-Chuiko, N.V., Toliupa, S.V., & Parkhomenko, I.I. (2021). Metody vyivlennia vtornhen u suchasnykh systemakh IDS [Intrusion detection methods in modern IDS systems]. Bezpeka informatsiinykh system i tekhnologii, 1(5), 19-26 [in Ukrainian].
9. Korniienko, V.I., Husiev, O.Yu., & Herasina, O.V. (2020). Intelektualne modeliuvannia neliniinykh dynamichnykh protsesiv u systemakh keruvannia, kiberbezpeky, telekomunikatsii: pidruchnyk [Intelligent modeling of nonlinear dynamic processes in control systems, cybersecurity, telecommunications: a textbook]. Dnipro: NTU «DP», 536 [in Ukrainian].
10. Crovella, M.E., & Bestavros, A. (1997). Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes. IEEE Transactions on Networking, 5(6), 835-846 [in English].

11. Herasina, O.V. (2018). *Metodyka intelektualnoi identyfikatsii ta prohnozuvannia trafiku v informatsiinykh telekomunikatsiinykh merezhakh* [Methodology of intelligent identification and traffic forecasting in information telecommunication networks]. *Systemy obrobky informatsii*, 1(152), 94-99 [in Ukrainian].
12. Terenchuk, S., Pashko, A., Yeremenko, B., Kartavykh, S., & Ershova, N. (2018). *Modeling Intelligent System for the Estimation of Technical State of Construction Structures*. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(2 (93)), 47-53 [in English].
13. Kondratenko, N.R., & Kuzemko, S.M. (2006). *Osnovy neironnykh merezh. Teoriia ta praktyka* [Fundamentals of Neural Networks. Theory and Practice]. Vinnytsia: VNTU, 104 [in Ukrainian].
14. Vladov, S., Shmelov, Y., & Petchenko, M. (2021). *A neuro-fuzzy expert system for the control and diagnostics of helicopters aircraft engines technical state*. *ICT in Education, Research and Industrial Applications. Integration, Harmonization and Knowledge Transfer: Proceedings of the 17th International Conference*, 40-52 [in English].
15. Wang, L.X., & Mendel, J.M. (1992). *Generating fuzzy rules by learning from examples*. *IEEE Transactions on systems, man, and cybernetics*, 22 (6), 1414-1427 [in English].
16. Ivakhnenko, A.G., & Madala, H.R. (1994). *Inductive learning algorithms for complex systems modeling*. London, Tokyo: CRC Press, 384 [in English].
17. Traffic Archive. [Electronic resource] – Access mode: <http://ita.ee.lbl.gov>.

Received 11.08.2025.  
Accepted 13.08.2025.

### ***Neural-fuzzy prediction of self-similar traffic of information and communication networks for attack detection systems***

*It was established that the current task is to build adequate predictive models of network self-similar traffic, which would allow their use in IDS for detecting network anomalies in real time with sufficient efficiency in terms of errors and reliability and increased efficiency. It is proposed to use adaptive filter-approximators in the form of adaptive fuzzy inference systems based on the Sugeno-Takagi, Takagi-Sugeno-Kang and Wang-Mendel algorithms for predicting self-similar traffic of information and communication networks. Since the problem of substantiating the type of neuro-fuzzy AFA with setting its parameters is polymodal, this requires the use of global optimization methods. The modeling of the network traffic forecasting process was carried out in the Matlab environment based on experimental data - traffic transmitted over the Internet. Multi-criteria optimization, direct random search and simulated annealing method were used as global optimization methods. The criterion of non-displacement (minimum shift) was used as the criterion of global optimization, and the criterion of parametric optimization was the regularity criterion, which was calculated on the test sample. As a result of the modeling, it was found that direct random search and multi-criteria optimization have the best convergence speed, the simulated annealing method showed the best performance, and the multi-criteria optimization algorithm showed the best convergence. It was also established that the minimum regularity criterion is met by the Anfis AFA based on the Takagi-Sugeno-Kanga algorithm, which is trained by a hybrid algorithm. Adequacy of the received traffic models of information and communication networks with experimental*

*data was checked and confirmed by the non-parametric criterion of signs. Further research should be aimed at substantiating and investigating the informativeness of the characteristics and models of self-similar network traffic and the effectiveness of the criteria and methods for recognizing attacks.*

*Key words: attack detection, information and communication network, prediction, self-similar traffic, adaptive fuzzy inference network, global optimization.*

**Герасіна Олександра Володимирівна** – доцент кафедри безпеки інформації та телекомунікацій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», к.т.н., доцент, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8196-0657>

**Gerasina Oleksandra** – Associate Professor of Department of Information Security and Telecommunications, Dnipro University of Technology, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8196-0657>

## АНАЛІЗ ОСНОВНИХ НАПРЯМКІВ ПІДВИЩЕННЯ ЕКСПЛУАТАЦІЙНОЇ НАДІЙНОСТІ ГІДРОЦИЛІНДРІВ

*Анотація.* У статті проведено комплексний аналіз основних напрямків підвищення експлуатаційної надійності гідроциліндрів, які є ключовими елементами гідросистем гірничо-металургійного обладнання. В умовах інтенсивної експлуатації в агресивному середовищі, що характеризується високим тиском, значними вібраціями та наявністю абразивного пилу, гідроциліндри зазнають підвищеного навантаження, що призводить до зростання частоти відмов. Найвразливішими в конструкції є ущільнювальні елементи, які піддаються швидкому зношенню та деградації через вплив температури, тиску й агресивних середовищ. Метою дослідження є ідентифікація критичних чинників, які впливають на ресурс і надійність гідроциліндрів, а також розробка обґрунтованих заходів для оптимізації їх роботи. Для цього застосовано методи статистичного аналізу відмов, нормованого розподілу ресурсу ущільнень і математичного моделювання напрацювання на відмову. У роботі запропоновано низку технічних рішень, серед яких удосконалення матеріалів і конструкції ущільнювальних елементів, впровадження уніфікованих конструктивних рішень, а також застосування шпилькових з'єднань, що суттєво знижують трудомісткість і час ремонту. Втілення цих заходів спрямоване на підвищення надійності гідроциліндрів і забезпечення стабільної, безперебійної роботи гідросистем у складних виробничих умовах. Особливу увагу в дослідженні приділено перспективам впровадження цифрових технологій моніторингу технічного стану та прогнозного аналізу ресурсу, що відкриває можливості для переходу до інтелектуального обслуговування гідравлічного обладнання.

*Ключові слова:* гідроциліндр, цифрова модель, ущільнення, знос, прогнозування ресурсу, уніфікація, технологічність, стандартизація, ремонт, прогнозне обслуговування.

**Постановка проблеми.** На сьогодні впровадження автоматичного керування комплексами гірничо-металургійного обладнання вимагає подальшого розвитку методів розрахунку виробничого обладнання і його приводів.

Питання вивчення надійності гідроциліндрів — надзвичайно важливий аспект у проектуванні промислових машин, особливо в гірничо-металургійній промисловості. Питання надійності гідроциліндрів в Україні активно досліджували вчені А.М. Підгорний, В.К. Зарубін, В.О. Марутов та Ю.М. Кузнецов, зосереджуючись на конструкціях, матеріалах і діагностиці. У світі ця проблема теж інтенсивно вивчається в університетах (Німеччина, США, Японія) та, особливо, у науково-дослідних підрозділах великих

промислових гігантів, таких як Parker Hannifin, Bosch Rexroth, Caterpillar. Ці компанії інвестують у передові матеріали, "розумні" технології та тестування, забезпечуючи глобальне лідерство в надійності гідравлічних систем.

Важливим є також питання збору точних статистичних даних, щодо частки відмов гідроциліндрів у загальній кількості відмов промислової техніки гірничо-металургійного комплексу України, проте, згідно з дослідженнями та практикою в галузі, гідроциліндри є критичними компонентами гідросистем, і їх відмови можуть суттєво впливати на працездатність обладнання. У гірничо – металургійній промисловості, де гідроциліндри використовуються в екстремальних умовах (високий тиск, пил, вібрація) частка відмов може бути більшою ніж 30%. **Основні причини відмов гідроциліндрів:** зношування ущільнень та штоків, корозія внутрішніх поверхонь, гідродари та перевантаження, недостатнє технічне обслуговування [1]:

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Надійність гідроциліндрів як ключових елементів гідросистем гірничих машин визначає загальну надійність приводу та довговічність обладнання. На відміну від стандартизованих насосів і розподільної апаратури, гідроциліндри зазвичай розробляються індивідуально для конкретних машин на відповідних виробничих підприємствах [2]. Їх надійність має оцінюватися на всіх етапах — від проєктування до експлуатації, що критично важливо для забезпечення якості гідросистем і машин загалом [3]. Це питання є особливо актуальним для технічного розвитку гірничого обладнання Криворізького регіону.

Одним із визначальних чинників якості гідроциліндрів є технологічність, яка охоплює конструктивно-технологічні властивості, що мінімізують витрати на підготовку виробництва. Відповідно до державного стандарту, така підготовка включає інформаційне, математичне й технічне забезпечення. При аналізі виробничих умов було доведено, що найбільш повно технологічність в виробничих умовах відображається кількісною системою показників. Основним недоліком кількісної оцінки технологічності конструкції деталей є велика трудомісткість робіт з визначення чисельних показників технологічності. Кількісна оцінка передбачає співставлення з показниками, які дане підприємство обрало як базові. Тож серед основних факторів, що впливають на оціночні показники є обсяг виконуваних робіт, обладнання, верстатне та інструментальне оснащення, сертифікований рівень якості випускаємої продукції, рівень автоматизації технологічної підготовки та самого виробництва, тощо.

При оцінці технічного рівня та якості гідроциліндрів, наприклад, використовуються такі основні показники якості: показник призначення  $K_n$ , що характеризує ступінь відповідності гідроциліндра його цільовому призначенню, конструктивне виконання та основні параметри; показник надійності та довговічності  $K_d$ , що характеризує властивості надійності гідроциліндрів у конкретних умовах їх використання; показник технологічності  $K_t$ , що характеризує ефективність конструктивно-технологічних рішень для забезпечення високої продуктивності праці при виготовленні та ремонті; естетичні показники  $K_{es}$ , що характеризують такі властивості виробу, як виразність, оригінальність, гармонійність, цілісність, відповідність стилю та ін.; показники стандартизації та уніфікації  $K_u$ , що характеризують ступінь використання стандартизованих

елементів та рівень уніфікації складових частин гідроциліндра; патентно-правові показники Кп, що характеризують ступінь патентного захисту в Україні та за кордоном, а також його патентну чистоту; економічні показники Ке, що відображають витрати на розробку, виготовлення та експлуатацію гідроциліндрів, а також економічну ефективність експлуатації [4].

**Мета дослідження.** Метою дослідження є аналіз основних факторів, що впливають на надійність гідроциліндрів, визначення напрямків удосконалення їх конструктивно-технологічних характеристик, а також обґрунтування можливостей застосування інформаційних технологій для моніторингу, прогнозування ресурсу та оптимізації експлуатаційних процесів.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Одиничні показники призначення гідроциліндра Ко – це такі як: діаметр активної площі  $D$ ; робочий тиск  $p$ ; максимальне робоче зусилля  $T = pD$ ; маса  $G$ ; довжина  $L_0$ ; максимальний габарит у поперечному перерізі  $D_{\max}$ ; загальна довжина напрямних  $H$ .

Враховуючи те, що підприємства і фірми - основні виробники гідроциліндрів в Україні, такі як, Гідросила ТЕТІС (Кропивницький), ТОВ «ТД Контакт» (Вінниця), НАК (Львів), Hydrocylinder.com.ua, Дрогобицький завод автомобільних кранів (ДЗАК), випускають гідроциліндри з різноманітними параметрами, зручно використовувати відносні одиничні показники призначення:

$$K_{o1} = T/G_0; \quad K_{o2} = T/L_0; \quad K_{o3} = T/D_{\max}, \quad (1)$$

де  $G_0$ -маса гідроциліндру при ході рівному нулю;  $L_0$ -довжина гідроциліндру при ході рівному нулю.

Узагальнений показник призначення може бути визначений з відношення:

$$K_n = 1/n(m_1 K_{n1} + m_2 K_{n2} + m_3 K_{n3}), \quad (2)$$

де  $n$  – кількість одиничних показників;  $m$  – вагомість одиничного показника.

Аналіз показує, що відносні показники призначення мають тенденції до росту по мірі росту діаметрів гідроциліндрів. Це цілком закономірно, так як для стандартного ряду діаметрів: 25; 32; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 320; 400 та інші –  $\phi = 1,56$ , а для ряду тисків –  $\phi = 1,25$ . Таким чином і одиничні показники і узагальнені показники по мірі росту діаметру гідроциліндрів повинні збільшуватись зі знаменником прогресії, що дорівнює  $\phi = 1,25$ , що майже витримується для всіх типів гідроциліндрів. Це дозволяє зробити висновок про те, що при оцінці якості, розрахунках показників якості, прогнозуванні показників якості та виборі базових показників, можна порівнювати показники різних типів гідроциліндрів, але тільки одного діаметра. Основні одиничні показники надійності гідроциліндрів такі: довговічність, середнє напрацювання на відмову, термін служби до капітального ремонту, термін служби до списання, середнє відновлення, середня трудомісткість ремонту. Середнє напрацювання гідроциліндра на відмову здебільшого залежить від довговічності його найбільш зношуваних елементів – ущільнень штока та поршня. Ці компоненти зазнають інтенсивного механічного,

гідрравлічного та температурного навантаження, і саме їх зношення найчастіше є причиною виходу гідроциліндра з ладу.

Середнє напрацювання на відмову (Mean Time To Failure, МТТФ) може визначатися експериментально або статистично за формулою [5]:

$$MTTF = \sum T_i / n, \quad (3)$$

де  $T_i$  – час (напрацювання), після якого вийшов з ладу  $i$ -й гідроциліндр;  $n$  – кількість досліджених зразків.

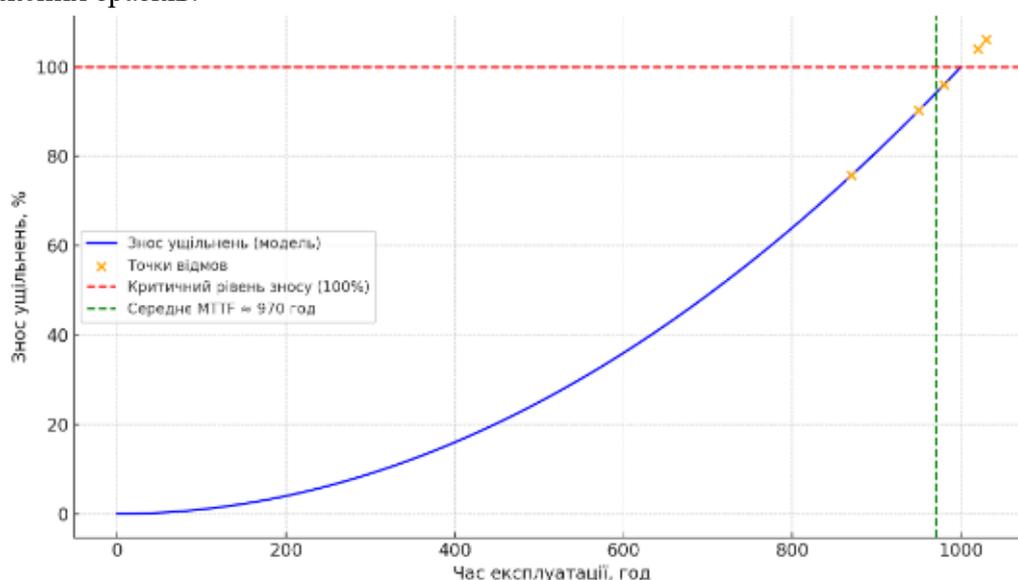


Рисунок 1 – Зростання зносу ущільнень гідроциліндра у часі з точками відмов

Як видно, знос відбувається поступово на початку, а ближче до кінця ресурсу (приблизно після 700 - 800 годин) починає різко прискорюватися – це типова поведінка ущільнень у реальних умовах експлуатації. Цей графік добре ілюструє, як реальні відмови збігаються з прогнозованим зносом ущільнень. Основні чинники, що впливають на довговічність ущільнень: якість матеріалів ущільнень (тип гуми, поліуретан, фторопласт тощо); температурні умови експлуатації; тиск у гідросистемі; якість обробки поверхонь штока та циліндра; чистота робочої рідини (наявність абразивних домішок прискорює знос); режим навантаження (частота циклів, амплітуда переміщення штока).

Таким чином, для прогнозування ресурсу гідроциліндра зазвичай розглядають довговічність ущільнень як критичний параметр, а середнє напрацювання визначають шляхом випробувань або на основі експлуатаційної статистики. ТУ 38 1051725-86, обумовлює ресурс ущільнень сумарним шляхом ковзання в середньому до 100 км, проте режим роботи гідроциліндра якість манжет, якість поверхонь тертя, чистоти рідини, температура і багато інших факторів дають такий розкид статистичних даних по середньому напрацюванню на відмову, що порівнювати їх поки що важко.

У практиці часто припускають, що напрацювання на відмову ущільнень має приблизно **нормальний розподіл**, де: **середнє значення ( $\mu$ )** – середній ресурс (наприклад, 970 год); **стандартне відхилення ( $\sigma$ )** – міра розкиду, зазвичай 10–25% від середнього значення (Рисунок 2). **Зелена пунктирна лінія** показує середнє напрацювання до від-

мови – **970 годин**; **блакитна зона** охоплює діапазон  $\pm 1$  стандартне відхилення (**150 год**), де зосереджено **близько 68% усіх відмов** (від 820 до 1120 год).

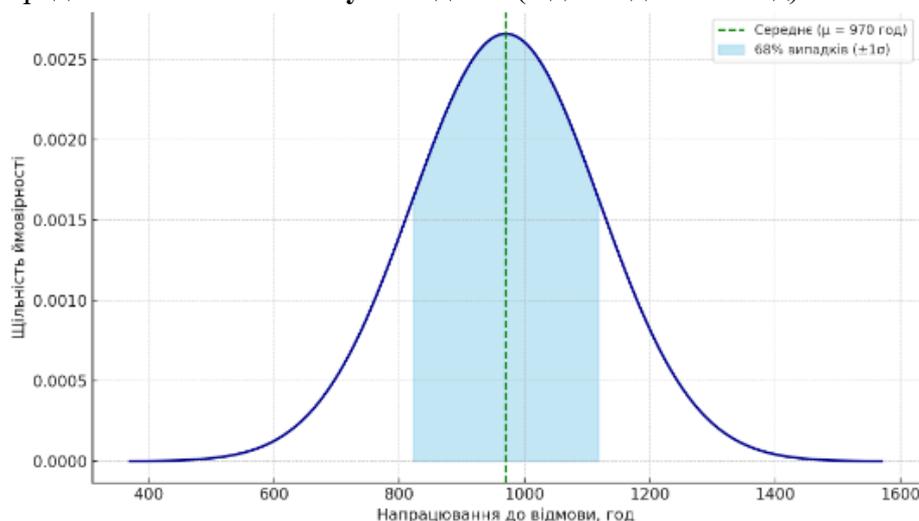


Рисунок 2 – Розподіл нормального розподілу ймовірності відмов ущільнень гідроциліндра

Розкид може становити  $\pm 200$ – $500$  годин або більше, залежно від якості ущільнень та умов роботи. Надійний прогноз ресурсу можливий тільки за умов проведення статистичних випробувань в умовах, наближених до експлуатаційних. За результатами аналізу відмов при експлуатації гідроприводів різних типів встановлено, що понад 90 % з них часткові і лише близько 10 % – повні, близько 60 % – параметричні і 40 % – функціональні. При цьому до параметричних відмов віднесені випадки виникнення витоків рідини, а до функціональних – прояв нестійкості і випадки пошкодження механічних елементів, які ще не призвели до втрати їх функціонування.

Порівняльний аналіз різних видів відмов показав, що частки раптових і поступових відмов приблизно рівні. Більша частина відмов обумовлена зовнішньою негерметичністю, решта – невідповідністю параметрів встановленим рівням, відсутністю функціонування агрегату або його елементів, порушенням динамічної стійкості, внутрішніми витокami, пошкодженнями фільтрів та ін.[6]

Термін служби гідроциліндра до капітального ремонту залежить від матеріалів пар тертя, від якості покриттів штока і гільзи, а також від способу установки і закріплення гідроциліндра на машині. У гідроциліндрах гірничих машин цей показник майже однаковий для різного конструктивного виконання та в середньому дорівнює 6-7 рокам. Термін служби до списання збігається з терміном експлуатації гірничого обладнання до утилізації.

Середній час відновлення відмови на гідроциліндрі багато в чому залежить від конструкції і, зокрема, від способу з'єднання кришок з корпусом, а також конструкції зовнішнього приєднувального елемента штока. Середня трудомісткість ремонту гідроциліндра залежить, в основному від трудомісткості відновлення корпусу, так як інші деталі для гідроциліндрів різної конструкції майже однакові. Показники якості за тех-

нологічністю характеризують витрати на виробництво гідроциліндра. Основні одиничні показники технологічності гідроциліндра - це трудомісткість і матеріаломісткість, точність розмірів, рівень уніфікації деталей. Найбільшу трудомісткість і в гідроциліндрі має корпус. Таким чином, технологічність гідроциліндру можна оцінити по технологічності його корпусу. З конструкцій, що порівнювались кращий показник технологічності має корпус гідроциліндру на шпильках. Необхідно відмітити, що ця конструкція найбільш технологічна не тільки в виготовленні, але й в складанні. До показників стандартизації і уніфікації необхідно віднести показник уніфікації деталей:

$$K_{y1} = D_y/D, \quad (4)$$

де  $D_y$  – кількість уніфікованих деталей в гідроциліндрі;  $D$  – загальна кількість деталей.

Показник уніфікації конструктивних елементів:

$$K_{y2} = Q_y/Q, \quad (5)$$

де  $Q_y$  – число уніфікованих типорозмірів;  $Q$  – загальне число типорозмірів конструктивних елементів.

Показник стандартизації деталей:

$$K_{y3} = E_{ст}/E, \quad (6)$$

де  $E_{ст}$  – число стандартних деталей;  $E$  – загальне число деталей.

Аналіз конструкцій гідроциліндрів, що порівнювались, показав, що  $K_{y2}$  та  $K_{y3}$  у них майже однаковий, а показник  $K_{y1}$  у гідроциліндрів на шпильках в два рази вище в порівнянні з іншими конструкціями за рахунок того, що у нього передня і задня голівки уніфіковані і всі десять варіантів кріплення гідроциліндра до машини здійснюються з використанням уніфікованих голівок. Естетичні показники гідроциліндра характеризуються цілісністю композиції, функціональною доцільністю форми, інформаційною виразністю, сучасним стилем, товарним виглядом. До патентно-правових показників гідроциліндрів відносяться показник патентного захисту, показник патентної чистоти, показник кількості вітчизняних винаходів, реалізованих в конструкції. Важливим показником якості є економічний показник (собівартість, відпускна ціна). Однак, враховуючи той факт, що порівнювані гідроциліндри виробляються на заводах з різними виробничими можливостями їх фактичні економічні показники важко порівняти. У цьому випадку можна стверджувати лише те, що кращими економічними показниками повинні мати найбільш технологічні гідроциліндри. Узагальнений показник якості гідроциліндру визначається з виразу:

$$K = 1/7(m_1K_n + m_2K_d + m_3K_t + m_4K_y + m_5K_{ec} + m_6K_p + m_7K_e), \quad (7)$$

де  $m$  – відповідний коефіцієнт вагомості окремого показника.

Найбільш недовговічними елементами гідроциліндру є ущільнення штока і поршня, шток, напрямна штоку, корпус і поршень. Одночасно з підвищенням показників надійності і геометричних параметрів гідроциліндрів, які впливають на компоновку всіх вузлів машин її габарити і масу, необхідно поліпшувати технологічний і економічний показник якості, тобто вдосконалення конструкції елементів гідроциліндра. Одночасно з підвищенням показників надійності та геометричних параметрів необхідно покращу-

вати технологічний та економічний показник якості, а це означає удосконалити конструкцію елементів гідроциліндра. Аналіз одиничних показників якості дозволяє визначити основні напрямки підвищення якості гідроциліндрів різноманітних гірничих машин. Показники призначення можуть бути поліпшені за рахунок підвищення робочого тиску в гідроциліндрах, зменшення маси, довжини при ході  $S=0$ , зменшення зовнішніх діаметрів. Аналіз показників гідроциліндрів показує, що за конструктивною якістю вітчизняні моделі не поступаються найкращим зарубіжним. Особливу увагу слід приділити надійності [7]. Низьке середнє напрацювання на відмову у гідроциліндрів з еластичним ущільненням пов'язане з швидким зносом ущільнень штока і поршня. Основні напрямки підвищення довговічності: застосування протекторних ущільнень, удосконалення брудознімача, сучасні фільтри для очищення рідини, покращення покриттів штока і гільзи, алмазне виглажування штоків і гільз. Інші показники надійності такі як: строк служби до капітального ремонту; строк служби до списання; середній час відновлення і середня трудомісткість ремонту – задовільні, однак вони можуть бути поліпшені шляхом підвищення якості матеріалів та пар тертя, поліпшення антикорозійних і зносостійких покриттів, використання в шарнірних з'єднаннях швидкоз'ємних проушин і втулок, поліпшення технологічності ремонту трудомістких деталей і вузлів.

Визначений резерв мають гідроциліндри гірничих машин і в питанні зниження трудомісткості ремонту. Доводку внутрішньої поверхні гільз слід виконувати на спеціальних верстатах; слід відмовитись від трудомісткого бронзування поршнів і втулок, а в тих випадках, коли чавун не задовольняє показнику надійності – використовувати покриття поліамідами; слід ширше застосовувати гідроциліндри на шпильках. У питанні підвищення якості гідроциліндрів велике значення має уніфікація та стандартизація. При проектуванні гідроциліндрів слід максимально використовувати повторно одні й ті ж елементи (наприклад, кришки штокової та поршневої порожнини) і створювати на базі вихідної моделі похідні гідроциліндри за кріпленням. Для цього застосовують методи секціонування, базового агрегату, конвертування, компаундування, модифікації, зміни розмірів і агрегування. Особливу увагу приділяють уніфікації розмірів приєднувальних елементів [8].

Сучасні підходи до підвищення експлуатаційної надійності гідроциліндрів дедалі частіше інтегрують цифрові інструменти — від моніторингу технічного стану до автоматизованого планування ремонту. Одним із перспективних напрямків є застосування систем технічного діагностування на базі сенсорних платформ, які збирають дані про тиск, температуру, вібрації, циклічність навантаження в режимі реального часу. Ці дані передаються у цифрові двійники гідроциліндрів — віртуальні моделі, що відображають фізичний стан компонента з урахуванням накопиченого зносу, впливу робочих умов та статистики відмов [10]. Для обробки таких даних використовуються системи машинного навчання і нейронні мережі, які здатні виявляти приховані закономірності між режимами роботи та ймовірністю виходу з ладу. На основі цього будується прогностична аналітика — математичне прогнозування залишкового ресурсу ущільнень і вузлів гідроциліндра (наприклад з використанням алгоритмів регресії та класифікації).

Інтеграція таких систем в корпоративні PLM/ERP-платформи дозволяє реалізувати концепцію Predictive Maintenance (прогнозного обслуговування), що забезпечує мінімізацію незапланованих простоїв, оптимізацію витрат на ремонтта відкриває можливість централізованого управління життєвим циклом гідроциліндрів на рівні підприємства. Окрім того, застосування CAD/CAE-програмного забезпечення (SolidWorks Simulation, ANSYS, Altair) сприяє створенню більш надійних конструкцій за рахунок попереднього моделювання навантажень і виявлення слабких місць, де може відбутися прискорений знос. Системи управління даними про виріб (PDM) підтримують актуальну документацію й історію обслуговування гідроциліндрів, що особливо важливо для гірничо-металургійної техніки в екстремальних умовах. Таким чином, поєднання механіки і цифрових технологій дозволяє не лише підвищити надійність гідроциліндрів, а й перейти до принципово нової моделі їх експлуатації — інтелектуальної, прогнозованої та економічно ефективної.

**Висновки.** Для стаціонарного обладнання доцільні гідроциліндри з призматичними головками та шпильковим з'єднанням, що спрощує уніфікацію й обслуговування. У мобільній техніці (екскаватори, самоскиди, бурові установки) використовують циліндричні головки — менш технологічні, але естетичніші й ергономічніші. При створенні уніфікованих рядів застосовують секціонування, базове агрегування, конвертування, компаундування, модифікацію геометрії та агрегатування. Особливу увагу приділяють стандартизації приєднувальних елементів для взаємозамінності, скорочення номенклатури та зниження витрат. Сучасні цифрові технології, інтегровані з механічним проєктуванням і управлінням, відкривають нові можливості для підвищення надійності гідроциліндрів через інтелектуальний моніторинг, прогнозне обслуговування та оптимізацію їх життєвого циклу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Канарчук В. Є., Полянський С. К., Дмитрієв М. М. Надійність машин : підручник. Київ : Либідь, 2003. 424 с.
2. Цивінда Н. І., Пікільняк А. В., Зуєв І. О., Журавель А. Г. Застосування математичних моделей кількісної оцінки конструктивно-технологічних ознак гідроциліндрів гірничих машин // Розвиток промисловості та суспільства : зб. наук. пр. міжнар. наук.-техн. конф., 22–24 травня 2024 р., Кривий Ріг. Кривий Ріг : КНУ, 2024. С. 171.
3. Пашинський О. М., Новицький А. В. Особливості конструкцій та експлуатаційної надійності гідроциліндрів // Вісник студентів факультету конструювання та дизайну Національного університету біоресурсів і природокористування України : зб. наук. пр. Вип. 10. Київ, 2022. С. 48–51.– 51.
4. Цивінда Н. І., Пікільняк А. В., Зуєв І. О. Основні напрямки зниження трудоємності ремонту гідроциліндрів // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем : матеріали XII Міжнар. наук.-практ. конф., 23–24 травня 2024 р., Чернігів. Том 1. С. 149–151.
5. Zhu, M., Zhao, J., & Wang, Q. (2017). Reliability evaluation of key hydraulic components for actuators of FAST based on small sample test. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18, 1561–1566. <https://doi.org/10.1007/s12541-017-0185-2>

6. Liu, Y., Qian, L., Zou, J., Xia, C., & Lian, Z. (2022). Study on failure mechanism and sealing performance optimization of compression packer. *Engineering Failure Analysis*, 136, 106176. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106176>
7. Link, R. E., Tan, A. C. H., Chua, P. S. K., & Lim, G. H. (2000). Condition monitoring of a water hydraulic cylinder by vibration analysis. *Journal of Testing and Evaluation*, 28. <https://doi.org/10.1520/JTE12142J>
8. Mahankar, P. S., & Dhoble, A. S. (2021). Review of hydraulic seal failures due to effect of medium to high temperature. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105552. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105552>
9. Надійність та експлуатація гідромашин і гідроприводів : навчальний посібник / В. Ф. Герман, В. О. Панченко, О. Г. Гусак, А. А. Папченко. – Суми : Сумський державний університет, 2016. – 175 с
10. Maheshwari, U., Jayasutha, D., Nair, I., Senthilraja, R., & Thanappan, S. (2024). Development of digital twin technology in hydraulics based on simulating and enhancing system performance. *Journal of Cybersecurity and Information Management*, 13, 50–65. <https://doi.org/10.54216/JCIM.130204>

#### REFERENCES

1. Kanarchuk V. Ye., Polianskyi S. K., Dmytriiev M. M. *Nadiinist mashyn : pidruch-nyk*. Kyiv : Lybid, 2003. 424 s.
2. Tsyvinda N. I., Pikilniak A. V., Zuiev I. O., Zhuravel A. H. Zastosuvannia matematichnykh modelei kilkisnoi otsinky konstruktyvno-tekhnologichnykh oznak hidrotsy-lindriv hirnychyykh mashyn // *Rozvytok promyslovosti ta suspilstva : zb. nauk. pr. mizhnar. nauk.-tekh. konf.*, 22–24 travnia 2024 r., Kryvyi Rih. Kryvyi Rih : KNU, 2024. S. 171.
3. Pashchynskyi O. M., Novytskyi A. V. Osoblyvosti konstruktsii ta ekspluata-tsiinoi nadiinosti hidrotsylindriv // *Visnyk studentiv fakultetu konstruiuvannia ta dyzainu Natsionalnoho universytetu bioresursiv i pryrodokorystuvannia Ukrainy : zb. nauk. pr. Vyp. 10*. Kyiv, 2022. S. 48–51.– 51.
4. Tsyvinda N. I., Pikilniak A. V., Zuiev I. O. Osnovni napriamky znyzhennia trudoiem-nosti remontu hidrotsylindriv // *Kompleksne zabezpechennia yakosti tekhnologichnykh protsesiv ta system : materialy KhII Mizhnar. nauk.-prakt. konf.*, 23–24 travnia 2024 r., Chernihiv. Tom 1. S. 149–151
5. Zhu, M., Zhao, J., & Wang, Q. (2017). Reliability evaluation of key hydraulic components for actuators of FAST based on small sample test. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 18, 1561–1566. <https://doi.org/10.1007/s12541-017-0185-2>
6. Liu, Y., Qian, L., Zou, J., Xia, C., & Lian, Z. (2022). Study on failure mechanism and sealing performance optimization of compression packer. *Engineering Failure Analysis*, 136, 106176. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106176>
7. Link, R. E., Tan, A. C. H., Chua, P. S. K., & Lim, G. H. (2000). Condition monitoring of a water hydraulic cylinder by vibration analysis. *Journal of Testing and Evaluation*, 28. <https://doi.org/10.1520/JTE12142J>

8. Mahankar, P. S., & Dhoble, A. S. (2021). Review of hydraulic seal failures due to effect of medium to high temperature. *Engineering Failure Analysis*, 127, 105552. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105552>
9. Nadiinist ta ekspluatatsiia hidromashyn i hidropryvodiv : navchalnyi posibnyk / V. F. Herman, V. O. Panchenko, O. H. Husak, A. A. Papchenko. – Sumy : Sumskyi derzhavnyi universytet, 2016. – 175 s
10. Maheshwari, U., Jayasutha, D., Nair, I., Senthilraja, R., & Thanappan, S. (2024). Development of digital twin technology in hydraulics based on simulating and enhancing system performance. *Journal of Cybersecurity and Information Management*, 13, 50–65. <https://doi.org/10.54216/JCIM.130204>

Received 11.08.2025.  
Accepted 13.08.2025.

### ***Analysis of the main directions for improving the operational reliability of hydraulic cylinders***

*The article analyzes the key factors influencing the operational reliability of hydraulic cylinders, which are critical components in the hydraulic systems of mining and metallurgical machinery. The relevance of the study is due to the high share of failures in hydraulic actuators under extreme working conditions such as high pressure, dust, and vibrations. The paper emphasizes the importance of considering reliability indicators at all stages: design, manufacturing, and operation. The purpose of the research is to identify the causes of wear, assess quality indicators, and propose design improvements. Particular attention is given to the manufacturability of hydraulic cylinders, with a detailed analysis of structural indicators including reliability, functionality, and economic efficiency. Quantitative indicators for design assessment are proposed, based on technological characteristics and statistical analysis of failure rates.*

*The article describes the methodology for determining key reliability parameters, such as mean time to failure (MTTF), service life before overhaul, and labor intensity of repairs. It demonstrates that the critical parameter in most failures is the wear of seals, which is influenced by working pressure, material properties, surface treatment, and fluid purity. The analysis highlights the role of standardized and unified elements, and the advantages of modular and threaded construction in increasing serviceability and lowering costs. The conclusions summarize the recommended directions for improving hydraulic cylinder reliability, including the use of protector seals, improved materials and coatings, enhanced filter systems, and design modifications to simplify repairs and assembly. The study also emphasizes the importance of aesthetic and patent-related aspects for competitive product development. Particular attention is paid to the potential of implementing digital technologies for condition monitoring and predictive resource analysis, enabling a transition toward intelligent maintenance of hydraulic equipment.*

**Цивінда Наталія Іванівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1526-5100>

**Пікільняк Андрій Валерійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування, Криворізький національний університет, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0898-4756>

**Зуєв Іван Олегович** – провідний фахівець ТОВ «Метінвест бізнес сервіс», ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0561-5833>

**Tsyvinda Nataliia** – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Kryvyi Rih National University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1526-5100>

**Pikilniak Andrii** – PhD (Engineering), Associate Professor, Department of Manufacturing Engineering, Kryvyi Rih National University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0898-4756>

**Zyev Ivan** – Senior Specialist at Metinvest Business Service LLC, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-0561-5833>

S.V. Sidletskyi, A.A. Demchyshyn, O.S. Kaleniuk, A.G. Donets

## **CYBER-GLOVE-BASED HUMAN-COMPUTER INTERACTION SYSTEM WITH FINGER FLEXION SENSING**

*Abstract. The potential for advancing augmented reality technologies is closely tied to the improvement of wearable input-output devices. The work presents a hardware-software system for human-computer interaction in the form of a cyber-glove. The system includes a manipulator developed using a wearable microcontroller board equipped with orientation and finger bending sensors, microcontroller firmware, a server application that reads and processes data using the Madgwick filter, and a client application that visualizes command execution. The use of the filter for processing sensor data enables stable determination of the manipulator's spatial orientation, while finger bending degree provides gesture-based commands. The proposed architecture and application programming interface allow the manipulator to be used for remote control tasks.*

*Keywords: cyber glove, human-computer interaction, virtual reality, Madgwick filter, augmented reality.*

**Problem Statement.** The increasing precision of data provided by microelectromechanical systems (MEMS) [1], combined with advances in bidirectional human-computer communication [2], has facilitated the emergence of new forms of human perception and experience – namely, virtual and augmented reality [3]. At the same time, the development of communication channels has enabled the use of manipulator devices for real-time control of remote robotic systems.

Today, the potential for advancing augmented reality technologies is closely tied to the improvement of wearable input-output devices. Image latency during rapid manipulator movement and unintuitive control schemes remain key challenges that hinder synchronization between the perceived and expected visual output, ultimately degrading immersion in the mixed reality continuum [4, 5]. For instance, a computer mouse, as an input device, captures motion only within a plane, while virtual reality (VR) system controllers incorporate buttons or triggers that are unnatural to human interaction. Such devices not only limit the ability to fully leverage intuitive hand and finger gestures but also necessitate additional layers of abstraction during the design of graphical user interfaces.

**Analysis of recent research and publications.** Among VR controllers, devices that use cameras (e.g., Oculus Rift [6]) or beacons (Lighthouse systems, such as HTC Vive [7]) for spatial tracking are in common use. The operation of such controllers requires fixed base stations equipped with cameras or optical systems. The latter have an advantage because these

stations do not require a direct line of communication with the personal computer and do not limit the number of sensors operating simultaneously. The control elements of these controllers mostly include buttons, triggers, analog sticks, and touchpads.

Regarding cyber gloves, existing devices do not require the installation of external tracking stations, which significantly simplifies the setup of such manipulators at the workspace. Cyber gloves can be connected either via cable or via wireless protocol. In this case, hand orientation in space is determined by a built-in inertial measurement unit (IMU), while additional sensors track finger movements, as implemented in CaptoGlove [8]. There are also more advanced models that provide haptic feedback through vibration motors or even include exoskeletons to restrict finger movement, such as CyberTouch and CyberGrasp from CyberGlove Systems LLC. Overall, cyber glove-based solutions are significantly more expensive than VR controllers, but their applications extend beyond VR systems. Manufacturers claim these devices are used for animation, modeling, biomechanics, robotics, and medical fields [9].

To determine the orientation of an object in space, the readings from inertial measurement sensors are processed using a filtering algorithm. The traditional approach employs the Kalman filter, which has a rather complex implementation and requires a large number of computations per update cycle, making its use infeasible on portable low-performance systems. Alternative filters based on quaternions have also been developed specifically to reduce computational load on portable systems [10]. For example, the Mahony filter [11] first estimates orientation from gyroscope readings and then corrects it using magnetometer data.

The Sebastian Madgwick filter is one of the newest methods for calculating spatial orientation based on accelerometer, gyroscope, and magnetometer readings (the magnetometer is optional) [12]. Applications based on this algorithm process data significantly faster than comparable methods, which is why it is often used in software development for quadcopters, as they need to respond quickly to changes in rotation angle while minimizing energy consumption. The variant of the filter that uses a magnetometer is more popular because it compensates for magnetic distortions and gyroscope bias. The filter represents the rotation angle using quaternions. In addition to sensor noise, one of the main challenges in calculating orientation based on gyroscope and magnetometer data is zero drift and magnetic distortion. The Madgwick filter compensates for these anomalies.

**Research objective.** To develop and validate a cyber-glove-based system for the input of orientation commands and state control of an object based on integrated finger bend sensing.

**Main research content.** *Sensor Data Fusion Filter.* The Madgwick algorithm was implemented in JavaScript as a server-side module according to the following approach.

The core of the Madgwick filter is the determination of orientation based on angular velocity and vector observations. Since the gyroscope measures angular velocity, the values obtained relative to the three axes can be used to define the vector (1), whose derivative describes the rate of change of the object's orientation relative to the Earth (2).

$$s_{\omega} = [0 \quad \omega_x \quad \omega_y \quad \omega_z]. \quad (1)$$

$${}^S_E \dot{q} = \frac{1}{2} {}^S_E \otimes {}^S \omega. \quad (2)$$

As a result of integrating the quaternion derivative  ${}^S_E \dot{q}_{\omega,t}$ , the orientation of the Earth relative to the object at time  $t$  (3) is obtained. Provided the initial conditions are known, the orientation values can be determined as (4).

$${}^S_E \dot{q}_{\omega,t} = \frac{1}{2} {}^S_E \widehat{q}_{est,t-1} \otimes {}^S \omega_t, \quad (3)$$

where  ${}^S \omega_t$  – angular velocity measured at time  $t$ ;

${}^S_E \widehat{q}_{est,t-1}$  – previous orientation estimate.

$$\begin{aligned} {}^S_E q_{\omega,t} &= \frac{1}{2} {}^S_E \widehat{q}_{est,t-1} + {}^S_E \dot{q}_{\omega,t} \Delta t, \\ {}^S_E q_{\omega,t} &= \frac{1}{2} {}^S_E \widehat{q}_{est,t-1} + {}^S_E \dot{q}_{\omega,t} \Delta t. \end{aligned} \quad (4)$$

When determining orientation based on vector observations, the filter utilizes quaternion representation of orientation, as it helps to find a unique orientation value, unlike Euler angle-based solutions, which can yield infinitely many solutions. The sensor's orientation  ${}^S_E \widehat{q}$  is considered as the value that aligns a predefined field direction in the Earth's coordinate system  ${}^E \widehat{d}$ . An optimization problem is formulated to represent  ${}^S_E \widehat{q}$  as the solution of equation (5), where (6) defines the objective function.

$$\min_{{}^S_E \widehat{q} \in \mathbb{R}^4} f({}^S_E \widehat{q}, {}^E \widehat{d}, {}^S \widehat{s}). \quad (5)$$

$$f({}^S_E \widehat{q}, {}^E \widehat{d}, {}^S \widehat{s}) = {}^S_E \widehat{q}^* \otimes {}^E \widehat{d} \otimes {}^S_E \widehat{q} - {}^S \widehat{s}, \quad (6)$$

where  ${}^S \widehat{s}$  – is the measured field direction in the sensor's coordinate system.

Gradient descent method is selected as the optimization algorithm. Based on the initial value  ${}^S_E \widehat{q}_0$  and the step size  $\mu$ , the orientation value can be computed over  $n$  iterations of (7).

$${}^S_E q_{k+1} = {}^S_E \widehat{q}_k - \mu \frac{\nabla f({}^S_E \widehat{q}_k, {}^E \widehat{d}, {}^S \widehat{s})}{\|\nabla f({}^S_E \widehat{q}_k, {}^E \widehat{d}, {}^S \widehat{s})\|}, k = 0, 1, 2, \dots, n. \quad (7)$$

Gradient descent algorithm ensured high performance at low sampling rates. As a rough estimate, each filter update involved 277 minimization iterations (or 109 if magnetometer data was unavailable), which was significantly less than what was typically required by an extended Kalman filter.

*Hardware Implementation.* The hardware development of the interaction system involved the MPU-9250 motion-processing unit (MPU) under the control of a SAM D21 microcontroller featuring a single core with a 32-bit Armv6-M architecture. The MPU integrated three spatial sensors – an accelerometer, a gyroscope, and a magnetometer – providing sufficient data to determine the object's spatial orientation with defined accuracy [13]. The board interface included analog-to-digital converter inputs, which were used to connect finger bend sensors based on resistive elements. The

glove (Fig.1) was connected to the computer via a USB 2.0 cable. Compared to wireless connections, this solution minimized signal latency, supplied power to a wearable device, and was justified in conditions where radio-electronic countermeasures are active. The cable ran under the shirt sleeve and did not restrict movement; the limited range imposed by the cable did not pose difficulties, considering the tasks and configuration of the hardware-software system.



Figure 1 – A low-cost cyber-glove with finger bend monitoring

*Software Implementation.* The client–server architecture of the software system, illustrated in Fig. 2, enables the glove to be used both on a single PC as well as on remote computers.

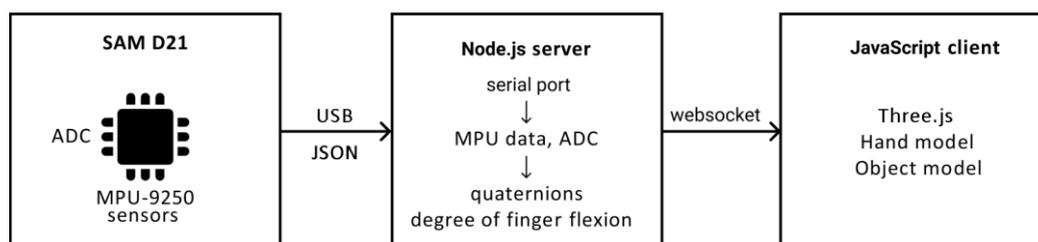


Figure 2 – Data flow diagram in human-computer interaction system

*Wearable device firmware implementation.* The firmware for the SAM D21 microcontroller was developed in C++. The main functionality of the firmware routines is to read data from the sensors and transmit it via the USB hardware port. Data is transferred in JSON format – a text-based data interchange format derived from JavaScript, and supported by many other programming languages. Using JSON allows for an intuitively readable data structure and enables data validation, as a parsing module will return an error if the string is corrupted.

*Server implementation.* Within the system, the personal computer acted as the master device where all computations were performed, including the Madgwick filter. Unlike the

typical approach, where filtering is done directly on the microcontroller, data processing was entirely moved to the server side that ran on the computer.

Initialization of the cyber-glove began with starting the calibration procedure on the server, implemented in Node.js. During this process, the boundary values for each resistive sensor were determined – corresponding to the fully extended and fully bent positions of the finger. The obtained data were then used for normalization, which was necessary for accurately calculating the degree of finger flexion.

*Hand modeling.* The hand model was created in Blender software using a rig for skeletal animation (Fig. 3). This approach enabled easy adjustments to the appearance and animation of model elements by modifying the settings of corresponding skeleton components.

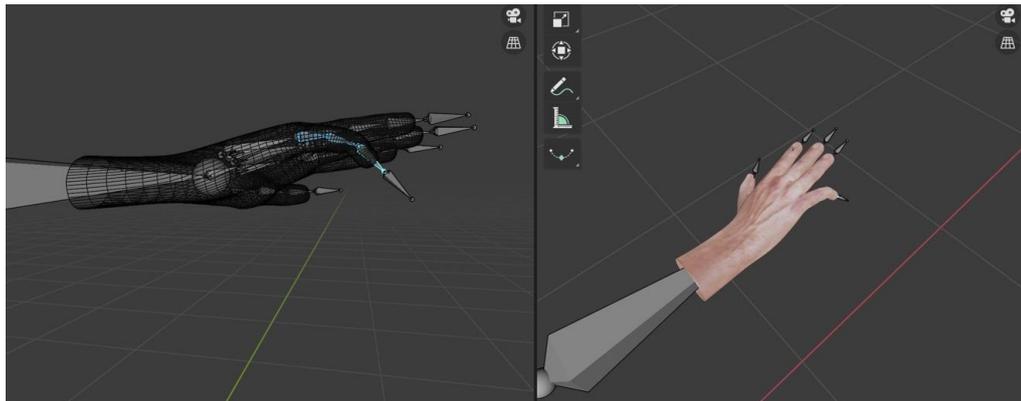


Figure 3 – 3D model of a hand with bone configuration

*Client implementation.* The client application was implemented using the JavaScript programming language and the Three.js library. The 3D model formats selected for use were FBX and GLTF, which enabled access to the built-in animation module functionality of Three.js.

The Three.js animation module allows for the manipulation of the model's bones (provided that a rig has been configured and bound to the polygonal mesh); sets of vertex positions for automatic interpolation between them; material properties, including color and transparency; visibility; position and rotation.

Skeletal animation, which employs rigging (the process of creating a skeleton structure), enables manipulation of a large number of a model's components using a relatively small set of control elements – namely, the skeleton's bones. Due to the hierarchical structure of the bones, the offset of each dependent bone is influenced not only by its own transformation, but also by the transformations of all its parent bones and joints.

Each Three.js object possesses two transformation matrices: a local matrix, which contains the position, rotation, and scale values relative to its parent, and a global matrix, which represents the object's absolute position in the scene.

To modify the wrist's rotation, a transformation matrix was used, while the visualization of finger bending was achieved through appropriate skeleton configuration of the 3D model (Fig. 4).



Figure 4 – Visualization of the cyber glove's orientation along with hand virtual model (avatar)

The client implementation featured several visualization modes for the controller. In one of the modes, the user could solve a Rubik's Cube using hand gestures. A quick inward twitch of a finger triggered the rotation of the corresponding face.

**Conclusions.** The work presented a hardware-software command input system for human-computer interaction, which included a physical manipulator, firmware for the manipulator's microcontroller, a server application that read and processed data using a sensor fusion filter, and a client-side web application that visualized command execution. The use of a sensor fusion filter provided a stable determination of the manipulator's spatial orientation and finger flexion, with an average delay of 36 ms.

The developed application programming interface made it possible to use the manipulator for remote control tasks with visualization on any device with an Internet connection and WebGL support – such as a smartphone.

#### REFERENCES

1. Abrash M. What VR could, should, and almost certainly will be within two years. URL: <http://media.steampowered.com/apps/abrashblog/Abrash%20Dev%20Days%202014.pdf> (date of access: 11.06.2025).
2. Senturia S. D. *Microsystem Design*. Springer New York, NY, 2000. 689 p.
3. Mine M.R. *Virtual Environment Interaction Techniques*. TR95-018. University of NC United States, 1995. 18p.
4. Sherman W.R., Craig A.B. *Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design*. Morgan Kaufmann Publishers, 2018. 582 p.
5. LaValle S.M. *Virtual reality*. Cambridge University Press, 2023. 426 p.
6. Davis B., Bryla K., Benton P.A. *Oculus Rift in Action*. Manning, 2015. 440 p.
7. Buckley S. This Is How Valve's Amazing Lighthouse Tracking Technology Works. URL: <https://gizmodo.com/this-is-how-valve-s-amazing-lighthouse-tracking-technol-1705356768> (date of access: 11.06.2025).
8. CptoGlove. *Wearable Gaming, VR, AR, PC & Mobile Controller*. CptoGlove LLC. URL: <https://www.kickstarter.com/projects/146300353/>

captoglove (date of access: 11.06.2025).

9. Sturman D. A survey of glove-based input. Zeltzer, 1994. 30 p.

10. Cocoli K., Badia L. A Comparative Analysis of Sensor Fusion Algorithms for Miniature IMU Measurements. Dept. of Information Engineering (DEI), University of Padova, Italy Conference: 24th International Seminar on Intelligent Technology and Its Applications (ISITIA): Indonesia, 2023. 6p.

11. Nitin J. S. Mathematical Model of an IMU. URL: <https://nitinjsanket.github.io/tutorials/attitudeest/mahony.html> (date of access: 11.06.2025).

12. Madgwick S. An efficient orientation filter for inertial and inertial/ magnetic sensor arrays. URL: [https://www.samba.org/tridge/UAV/madgwick\\_internal\\_report.pdf](https://www.samba.org/tridge/UAV/madgwick_internal_report.pdf) (date of access: 11.06.2025).

13. 9DoF Razor IMU M0 Hookup Guide. URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/9dof-razor-imu-m0-hookup-guide> (date of access: 11.06.2025).

Received 11.08.2025.

Accepted 13.08.2025.

### **Комплекс людино-машинної взаємодії**

#### **на основі кібер-рукавички з реєстрацією згину пальців**

*Потенціал розвитку технологій доповненої реальності тісно пов'язаний із вдосконаленням носимих пристроїв введення-виведення. Метою дослідження є розробка та валідація програмно-апаратного комплексу на основі кібер-рукавички для введення команд орієнтації та керування станом об'єкта на основі інтегрованого вимірювання згину пальців. Комплекс включає маніпулятор, розроблений на основі носимої плати мікроконтролера, оснащеної датчиками орієнтації та згину пальців, прошивку мікроконтролера, серверний застосунок для зчитування та обробки даних з використанням фільтра Маджвіка, а також клієнтський застосунок для візуалізації виконання команд. Використання фільтра для обробки даних датчиків забезпечує стабільне визначення просторової орієнтації маніпулятора, а ступінь згину пальців — подачу команд на основі жестів. Запропонована архітектура та інтерфейс програмування застосунків дозволяють використовувати маніпулятор для задач дистанційного керування.*

*Ключові слова: кіберрукавичка, взаємодія людини з комп'ютером, віртуальна реальність, фільтр Меджвіка, доповнена реальність.*

**Сідлецький Станіслав Валентинович** – магістр кафедри автоматизації проектування енергетичних процесів та систем, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8516-8665>

**Демчишин Анатолій Анатолійович** – к.т.н., доцент кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7754-0185>

**Каленюк Олександр Сергійович** – к.т.н., старший викладач кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3141-4840>

**Донець Андрій Георгійович** – к.ф.-м.н., доцент кафедри цифрових технологій в енергетиці, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8122-051X>

**Sidletskyi Stanislav Valentynovych** – graduate student of the department of automation of design of energy processes and systems, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-8516-8665>

**Demchyshyn Anatoliy Anatoliyovych** – candidate of engineering sciences, assistant professor, department of digital technologies in energy, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7754-0185>

**Kaleniuk Oleksandr Sergiyovych** - candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, department of digital technologies in energy, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-3141-4840>

**Donets Andrii Georgievich** – candidate of physical and mathematical sciences, assistant professor, department of digital technologies in energy, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8122-051X>

## АСИМПТОТИКА ВИПАДКОВОЇ ЕВОЛЮЦІЇ НА РЕГЕНЕРУЮЧОМУ ПРОЦЕСІ

*Анотація.* Стаття присвячена асимптотичному аналізу випадкових еволюцій, які побудовані на основі регенеруючого процесу. У роботі досліджується клас стохастичних процесів з нелінійним нормуванням часу, що виникають у моделях, де наявна структурна регенерація або ефекти пам'яті. Такі процеси є важливими при моделюванні складних систем, поведінка яких відновлюється або змінюється у випадкові моменти часу. Основну увагу приділено побудові рівняння відновлення для математичного сподівання випадкової еволюції, заданої на регенеруючому процесі, з урахуванням нелінійного масштабу часу. Отримане рівняння описує динаміку середніх значень еволюції у термінах функції регенерації, що визначає статистичну структуру основного процесу. У статті доведено граничну теорему, яка встановлює асимптотичну поведінку середніх значень випадкової еволюції при зростанні часу до нескінченності. Встановлено, що нелінійне нормування часу істотно впливає на характер асимптотики, змінюючи як швидкість росту, так і форму граничного представлення.

*Ключові слова:* випадкова еволюція, регенеруючий процес, рівняння відновлення, нелінійне нормування часу.

**Постановка проблеми.** Випадкові еволюції, задані на регенеруючих процесах, широко застосовуються у різних прикладних галузях, таких як теорія надійності, системи масового обслуговування, біологічне моделювання та інші. Ці стохастичні системи часто характеризуються складною динамікою через наявність ефектів пам'яті та структурних механізмів регенерації, що вимагають застосування нелінійного нормування часу для адекватного опису їх поведінки.

Незважаючи на значні результати, отримані для класичних рівнянних процесів і випадкових еволюцій, існує нестача узагальнених досліджень, які б описували асимптотичну поведінку таких еволюцій із нелінійним нормуванням часу. Зокрема, складністю є побудова відповідних рівнянь відновлення для математичних сподівань випадкових еволюцій, що пов'язані з регенеруючими процесами, та доведення граничних теорем, які характеризують їх довгострокову асимптотику.

Введення нелінійного нормування часу ускладнює аналітичний опис, оскільки змінює часову шкалу нетривіальним способом, впливаючи як на швидкість зростання, так і на форму асимптотичних представлень. Отже, центральною проблемою цього дослідження є розробка теоретичного апарату для аналізу асимптотичних властивостей

випадкових еволюцій на регенеруючих процесах із нелінійним нормуванням часу. Це передбачає формулювання відповідних рівнянь відновлення та доведення теорем про асимптотичну поведінку середніх значень, що заповнить важливу прогалину у теорії та надасть інструменти для практичних застосувань у стохастичному моделюванні.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У сучасній теорії випадкових еволюцій та рівнянь відновлення досить широко вивчені класичні випадки з лінійним нормуванням часу. Проте дослідження, пов'язані з нелінійним нормуванням та регенеруючими процесами, залишаються актуальними і викликають підвищений інтерес.

У статті [1] розглядається асимптотика перехідних ймовірностей напівмарковського процесу. Зосереджується увага на побудові теоретичних основ для аналізу стохастичних процесів із властивістю регенерації, розкриває структуру перехідних ймовірностей у межах напівмарковських моделей. Цей підхід є базовим для подальшого розвитку теорії випадкових еволюцій із урахуванням складних залежностей у часі.

В праці [2] сформульовано граничну теорему для багатовимірного рівняння відновлення. Ця робота має велике значення для узагальнення класичних результатів теорії відновлення на випадки багатовимірних процесів, що дозволяє більш гнучко описувати складні стохастичні системи з декількома взаємопов'язаними параметрами.

У статті [3] досліджується рівняння відновлення у нелінійній апроксимації. Розглядається вплив нелінійного нормування часу на поведінку розв'язків, що є ключовим аспектом для моделювання випадкових процесів із змінною часовою шкалою.

**Мета дослідження.** Метою даної роботи є розробка теоретичних основ та отримання нових результатів щодо асимптотичної поведінки випадкових еволюцій, заданих на регенеруючих процесах з нелінійним нормуванням часу. Зокрема, завдання полягає у формулюванні та дослідженні рівнянь відновлення, які описують математичне сподівання випадкової еволюції, а також у доведенні граничних теорем, що характеризують довготривалу асимптотику цих процесів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Нехай  $(E, \mathcal{B})$  - фазовий простір, де  $E$  - повний метричний сепарабельний простір, а  $\mathcal{B} = \mathcal{B}(E) - \sigma$  - алгебра борелевих підмножин.

**Означення.** Випадковий процес  $x(t)$  у фазовому просторі  $(E, \mathcal{B})$  називають регенеруючим, якщо існує зростаюча послідовність випадкових величин  $\tau_0 = 0, \tau_1, \tau_2, \dots$ , таких, що обривні випадкові процеси

$$x^n(t) = x(\tau_n + t)$$

при

$$0 \leq t < \tau_{n+1} - \tau_n,$$

однаково розподілені і незалежні в сукупності.

Випадкові величини  $\tau_1, \tau_2, \dots$  називають моментами регенерації випадкового процесу.

Нехай  $x_1(t), x_2(t), \dots, x_d(t)$  - незалежні регенеруючі процеси, задані на фазовому просторі  $(E, B)$ . Тоді для кожного процесу  $x_i(t)$  моменти регенерації позначатимемо  $\tau_i^{(k)}$ .

Розглянемо дані процеси в масштабі часу  $\frac{t}{g(\varepsilon)}$  з нормуючим множником  $g(\varepsilon) \rightarrow 0$  при  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Тоді

$$x_i^{(k)}\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right) = x_i\left(\tau_i^{(k)} + \frac{t}{g(\varepsilon)}\right)$$

при

$$0 \leq \frac{t}{g(\varepsilon)} < \tau_i^{(k+1)} - \tau_i^{(k)},$$

незалежні копії процесу  $x_i\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right)$  на проміжку  $[0; \tau_i^{(k+1)} - \tau_i^{(k)})$ .

Нехай  $(v_n)_{n=0}^{\infty}$  - однорідний ланцюг Маркова зі скінченною множиною станів  $\{1, 2, \dots, d\}$ . Крім того, регенеруючі процеси і ланцюг Маркова – незалежні.

Позначимо через

$$p_{ij} = P\{v_{n+1} = j | v_n = i\}$$

перехідну ймовірність ланцюга Маркова за один крок.

Нехай

$$\sigma_0 = 0, \quad \sigma_1 = \tau_{v_0}^{(1)}, \quad \sigma_2 = \tau_{v_0}^{(1)} + \tau_{v_1}^{(2)}, \dots$$

причому

$$v\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right) = v_{n-1}$$

при

$$\sigma_{n-1} \leq \frac{t}{g(\varepsilon)} < \sigma_n, \quad n \geq 1.$$

Розглянемо випадковий процес

$$x\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right) = x_{v_{n-1}}^{(n)}\left(\frac{t}{g(\varepsilon)} - \sigma_{v_{n-1}}\right)$$

при

$$\sigma_{n-1} \leq \frac{t}{g(\varepsilon)} < \sigma_n, \quad n \geq 1.$$

Задамо процес переносу на траєкторіях процесу  $x\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right)$  наступним чином

$$\frac{T\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right)}{dt} = A\left(x\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right)\right) \cdot T\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right)$$

$$T(0) = I,$$

де  $I$  - одинична матриця, а  $A : E \rightarrow R^n$ , при чому  $\sup_{x \in E} \|A(x)\| < M$ .

Тоді розв'язок даної задачі можна подати у вигляді

$$T\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right) = \begin{cases} T_{v_0}\left(0, \frac{t}{g(\varepsilon)}\right), & 0 \leq \frac{t}{g(\varepsilon)} < \sigma_1 \\ T_{v_0}(0, \sigma_1) \cdot T_{v_1}\left(\sigma_1, \frac{t}{g(\varepsilon)}\right), & \sigma_1 \leq \frac{t}{g(\varepsilon)} < \sigma_2 \\ T_{v_0}(0, \sigma_1) \cdot T_{v_1}(\sigma_1, \sigma_2) \cdot T_{v_2}\left(\sigma_2, \frac{t}{g(\varepsilon)}\right), & \sigma_2 \leq \frac{t}{g(\varepsilon)} < \sigma_3 \\ \dots & \dots \end{cases}$$

Функції  $T_i(s, t)$  є розв'язками задач

$$\begin{aligned} \frac{dT_i(s, t)}{dt} &= A(x_i(t)) \cdot T_i(s, t), \\ T_i(s, s) &= I, \quad i = 1, \dots, d. \end{aligned}$$

Нехай

$$\begin{aligned} G_i^{(k)}\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right) &= T_i\left(\tau_i^{(k)}, \tau_i^{(k+1)} + \frac{t}{g(\varepsilon)}\right), \\ 0 \leq \frac{t}{g(\varepsilon)} &< \tau_i^{(k+1)} - \tau_i^{(k)}, \quad k = 0, 1, \dots \end{aligned}$$

Крім цього,

$$G_i(t) = T_i(0, t).$$

Тоді процес  $T\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right)$  можна подати наступним чином

$$T\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right) = \begin{cases} G_{v_0}\left(\frac{t}{g(\varepsilon)}\right), & 0 \leq \frac{t}{g(\varepsilon)} < \sigma_1 \\ G_{v_0}(\sigma_1) \cdot G_{v_1}\left(\frac{t}{g(\varepsilon)} - \sigma_1\right), & \sigma_1 \leq \frac{t}{g(\varepsilon)} < \sigma_2 \\ G_{v_0}(\sigma_1) \cdot G_{v_1}(\sigma_2 - \sigma_1) \cdot G_{v_2}\left(\frac{t}{g(\varepsilon)} - \sigma_2\right), & \sigma_2 \leq \frac{t}{g(\varepsilon)} < \sigma_3 \\ \dots & \dots \end{cases}$$

Нехай виконуються наступні умови:

1. Моменти регенерації  $\tau_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, d$ , мають негратчастий розподіл та  $E\tau_i < \infty$ ;
2. Регенеруючі процеси  $x_i(t)$ ,  $i = 1, 2, \dots, d$ , стохастично неперервні на проміжках  $[0; \tau_i)$ ;

3. Ланцюг Маркова  $v_1, v_2, \dots$  - гранично розкладний, а граничний ланцюг Маркова є ергодичним на кожній із неперетинних множин  $I_1, \dots, I_r$  зі стаціонарним розподілом

$$\bar{p}^{(s)} = \left( p_i^{(s)} \right)_{i \in I_s}, \text{ при чому } p_{ij}^\varepsilon \rightarrow a_{sk} \cdot p_{ij}, \quad i \in I_s, j \in I_k;$$

4.  $\lim_{x \rightarrow \infty} A(x) = A$  за нормою оператора;

$$5. \int_0^\infty (G_{ij}(t) - I) \cdot P(\tau_i \in dt) \cdot \bar{1} = 0 \text{ і } \sum_{i \in I_s} p_i^{(s)} \left( \bar{1} \cdot \int_0^\infty (G_i(t) - I) P(\tau_i \in dt) \right) \cdot p_{ij} = 0.$$

**Теорема.** Нехай виконуються умови 1-5. Тоді існує нормуючий множник  $g(\varepsilon) \rightarrow 0$  при  $\varepsilon \rightarrow 0$  і ненульова матриця  $C$  розмірності  $r \times r$  такі, що

$$E \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = j \mid v(0) = i \right) \rightarrow q_{sk}(t) \cdot \frac{p_j^{(k)}}{\pi^{(k)}} \cdot E_j \left( \int_0^{\tau_j} G_j(u) du \right),$$

$$\text{де } q_{sk}(t) = [e^{tC}]_{sk}, \quad \pi^{(k)} = \sum_{i \in I_k} p_i^{(k)} \cdot \left( \bar{1} \cdot \int_0^\infty G_i(t) \cdot P(\tau_i \in dt) \right) \cdot E \tau_i.$$

**Доведення.** Позначимо

$$E_i \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = j \right) = E \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = j \mid v(0) = i \right).$$

Розпишемо за формулою повного математичного сподівання для моменту регенерації  $\sigma_1$  процесу  $x(t)$

$$E_i \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = j \right) = E_i \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = j, \frac{t}{g(\varepsilon)} < \sigma_1 \right) + \\ + \int_0^{\frac{t}{g(\varepsilon)}} E_i \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = j, \sigma_1 \in du \right).$$

В початковий момент часу  $v(0) = i$  збігаються моменти регенерації  $\sigma_1$  та  $\tau_1$ , а до моменту  $\sigma_1$  збігаються процеси  $x \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right)$  та  $x(t)$ , і, відповідно  $T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right)$  збігається з  $G_i(t)$ .

Таким чином

$$E_i \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = j, \frac{t}{g(\varepsilon)} < \sigma_1 \right) = a_{ij} E_i (G_i(t), t < \tau_1).$$

Обчислимо інтеграл

$$\int_0^{\frac{t}{g(\varepsilon)}} E_i \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = j, \sigma_1 \in du \right) = \\ = \sum_{k=1}^d \int_0^{\frac{t}{g(\varepsilon)}} E_i \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = j, v(\sigma_1) = k, \sigma_1 \in du \right) =$$

$$= \sum_{k=1}^d \int_0^{\frac{t}{g(\varepsilon)}} E_i(\Gamma(\tau_i), v(\tau_i) = k, \tau_i \in du) \cdot E_k \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} - u \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} - u \right) \right).$$

В результаті отримаємо

$$E_i \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = j \right) = a_{ij} E_i(G_i(t), t < \tau_1) + \\ + \sum_{k=1}^d \int_0^{\frac{t}{g(\varepsilon)}} E_i(\Gamma(\tau_i), v(\tau_i) = k, \tau_i \in du) \cdot E_k \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} - u \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} - u \right) \right).$$

Ввівши наступні позначення

$$X_{ij} \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = E_i \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = j \right),$$

$$A_{ij} \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = a_{ij} E_i(G_i(t), t < \tau_1),$$

$$F_{ij}(dt) = E_i(\Gamma(\tau_i), v(\tau_i) = k, \tau_i \in dt),$$

отримаємо рівняння відновлення

$$X_{ij} \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = A_{ij} \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) + \sum_{k=1}^d \int_0^{\frac{t}{g(\varepsilon)}} F_{ik}(dt) \cdot X_{kj} \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} - u \right).$$

За умов 1-5 та теоремою статті [1], отримаємо твердження теореми

$$E \left( T \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right), v \left( \frac{t}{g(\varepsilon)} \right) = j \mid v(0) = i \right) \rightarrow q_{sk}(t) \cdot \frac{P_j^{(k)}}{\pi^{(k)}} \cdot E_j \left( \int_0^{\tau_j} G_j(u) du \right).$$

Теорему доведено.

**Висновки.** У роботі проведено дослідження асимптотичної поведінки випадкових еволюцій, побудованих на основі регенеруючих процесів із нелінійним нормуванням часу. Запропоновано рівняння відновлення для математичного сподівання випадкової еволюції, що відображає складну структуру залежностей у процесі та вплив нелінійного масштабування часу.

Доведено граничну теорему, яка встановлює асимптотичний характер середніх значень випадкової еволюції при необмеженому зростанні часу. Встановлено, що нелінійне нормування суттєво впливає на форму та швидкість асимптотичного збігу, що має важливе значення для моделювання прикладних задач із подібною структурою.

Отримані результати розширюють теоретичний апарат теорії випадкових еволюцій і можуть бути застосовані в аналізі складних стохастичних систем у таких галузях, як теорія надійності, біологія, економіка та інші, де регенеративні механізми і нелінійність часу відіграють ключову роль.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на узагальнення отриманих результатів для багатовимірних випадкових еволюцій та більш складних видів нормування часу.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Ярова О.А. Асимптотика перехідних ймовірностей напівмарковського процесу / О.А. Ярова // Кібернетика та системний аналіз. – 2025. – Т. 61, № 1. – С. 158–160. DOI: 10.1007/s10559-025-00752-4
2. Yarova O.A., Yeleyko Y.I. Limit theorem for multidimensional renewal equation / O.A. Yarova, Ya.I. Yeleyko // Cybernetics and Systems Analysis. – 2022. – Vol. 58, No. 1. – P. 144–147. DOI: 10.1007/s10559-022-00443-4
3. Yarova O.A., Yeleyko Y.I. The renewal equation in nonlinear approximation / O.A. Yarova, Ya.I. Yeleyko // Matematychni Studii. – 2021. – Vol. 56, No. 1. – P. 103–106. DOI: 10.30970/ms.56.1.103-106
4. Ярова О.А. Асимптотичне зображення нормуючого множника рівняння відновлення / О.А. Ярова // Вісник Львівського університету. Серія мех.–мат. – 2020. – Вип. 89. – С. 80–88.
5. Yeleyko Ya.I. On an asymptotic representation of the Perron root of a matrix-valued evolution / Ya.I. Yeleyko, I.I. Nishchenko // Ukrain. Mat. Zh. –1996. – Vol. 48, No. 1. – P. 35–43.
6. Feller W. A simple proof for renewal theorems / W. Feller // Communications on Pure and Applied Mathematics. – 1961. – Vol. 14. – P. 285–293.

#### REFERENCES

1. Yarova, O.A. Asymptotics of transition probabilities of a semi-Markov process / O.A. Yarova // Cybernetics and Systems Analysis. – 2025. – Vol. 61, No. 1. – P. 158–160. DOI: 10.1007/s10559-025-00752-4
  2. Yarova, O.A., Yeleyko, Ya.I. Limit theorem for multidimensional renewal equation / O.A. Yarova, Ya.I. Yeleyko // Cybernetics and Systems Analysis. – 2022. – Vol. 58, No. 1. – P. 144–147. DOI: 10.1007/s10559-022-00443-4
  3. Yarova, O.A., Yeleyko, Ya.I. The renewal equation in nonlinear approximation / O.A. Yarova, Ya.I. Yeleyko // Matematychni Studii. – 2021. – Vol. 56, No. 1. – P. 103–106. DOI: 10.30970/ms.56.1.103-106
  4. Yarova, O.A. Asymptotic representation of the normalization factor of the renewal equation / O.A. Yarova // Visnyk of the Lviv University. Series Mechanics and Mathematics. – 2020. – Issue 89. – P. 80–88.
  5. Yeleyko, Ya.I., Nishchenko, I.I. On an asymptotic representation of the Perron root of a matrix-valued evolution / Ya.I. Yeleyko, I.I. Nishchenko // Ukraina
  6. Mathematical Journal. – 1996. – Vol. 48, No. 1. – P. 35–43.
- Feller, W. A simple proof for renewal theorems / W. Feller // Communications on Pure and Applied Mathematics. – 1961. – Vol. 14. – P. 285–293.

Received 11.08.2025.  
Accepted 15.08.2025.

*Asymptotics of random evolution on a renewal process*

*This article is devoted to the asymptotic analysis of random evolutions constructed on the basis of a regenerating process. The study focuses on a class of stochastic processes with nonlinear time normalization, which arise in models that involve structural regeneration or memory effects. These processes are important for describing complex systems whose behavior restarts or changes at random time points.*

*Particular attention is paid to the derivation of a renewal-type equation for the expectation of the random evolution defined on the regenerating process under a nonlinear transformation of time. The obtained equation characterizes the dynamics of the mean values of the evolution in terms of the regeneration function that reflects the probabilistic structure of the underlying process.*

*A limit theorem is proved, which establishes the asymptotic behavior of the expected values of the random evolution as time tends to infinity. It is shown that the nonlinear normalization significantly affects the nature of the asymptotic regime, influencing both the growth rate and the form of the asymptotic representation. Special attention is given to the case where the time normalization is defined by a monotonic increasing function, allowing for modeling acceleration or deceleration effects in the evolution.*

*The theoretical results obtained in this work can be applied to the analysis of models in reliability theory, queueing systems, population dynamics, and various applied areas where randomness, regeneration, and nonlinearity in time evolution play a crucial role. The developed approach provides a general framework for studying the long-term behavior of systems driven by random inputs and regenerating mechanisms.*

*Additionally, the results lay the groundwork for further generalizations to multidimensional random evolutions and more complex forms of time scaling in stochastic systems.*

*Keywords: random evolution, regenerating process, renewal equation, nonlinear time normalization.*

**Ярова Оксана Анатоліївна** - доцент кафедри математичної статистики і диференціальних рівнянь, кандидат фізико-математичних наук, Львівський національний університет імені Івана Франка, ORCID: 0000-0002-6284-1193

**Yarova Oksana Anatoliivna** - Associate Professor, Department of Mathematical Statistics and Differential Equations, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Ivan Franko National University of Lviv, ORCID: 0000-0002-6284-1193

## СИСТЕМНИЙ ПІДХІД ДО АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИПІКАННЯ ХЛІБА НА ОСНОВІ ПАРАМЕТРИЗАЦІЇ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ

*Анотація. Аналіз сучасного стану автоматизації процесу випікання хліба свідчить про обмеженість існуючих систем керування, зокрема через відсутність ефективного контролю за вологістю середовища в зоні зволоження пекарної камери. Більшість відомих рішень акцентують увагу на регулюванні температури, витрат палива та швидкості поду, залишаючи поза увагою ключові параметри, що безпосередньо впливають на якість продукції. У зв'язку з цим зростає актуальність розроблення адаптивних та оптимізованих систем автоматизованого керування випіканням. Метою дослідження є підвищення ефективності процесу випікання хлібобулочних виробів шляхом побудови дворівневої системи автоматичного керування. Нижній рівень такої системи забезпечує регулювання основних параметрів середовища, тоді як верхній виконує функції оптимізації тепловологого режиму в зоні зволоження, враховуючи динамічні зміни характеристик тіста та зовнішні збурення. У дослідженні проаналізовано структуру та режими роботи об'єкта керування — хлібопекарської тунельної печі Г4-ПХЗС-25. Здійснено параметризацію процесу, визначено вплив технологічних режимів на якість продукції та техніко-економічні показники, а також сформульовано вимоги до системи автоматичного керування для забезпечення стабільного результату. Результати дослідження формують наукову основу для подальшого розвитку інтелектуальних систем керування хлібопекарським виробництвом.*

*Ключові слова: автоматизація процесу випікання, тепловологий режим, система керування, оптимізація, параметризація, хлібопекарська піч, енергозбереження, технологічний процес.*

**Постановка проблеми.** Харчова промисловість, як соціально значуща галузь, забезпечує продовольчу безпеку і здоров'я населення, що визначає її стратегічне значення. Хлібопекарська промисловість, яка виробляє хліб – продукт першої необхідності, потребує підвищення якості продукції. Цього можна досягти оптимізацією ключових технологічних процесів, особливо випікання, що безпосередньо впливає на якість виробів і енергоспоживання.

У процесі випікання критичним є забезпечення стабільного тепловологого режиму в зоні зволоження пекарної камери, де формуються основні якісні показники хліба. Однак реальні виробничі умови характеризуються постійними змінами та неконтрольованими збуреннями, що призводить до нестабільності тепловологого режиму. Це

негативно впливає на якість продукції, викликає підвищене енергоспоживання та зростання виробничих витрат. Незважаючи на існування численних систем автоматичного керування, більшість з них не враховують комплексно вплив вологості середовища на процес випікання, що є однією з головних причин нестабільності якості. Відсутність ефективного управління тепловологим режимом знижує стабільність і відтворюваність властивостей хліба, а також призводить до неоптимального використання енергетичних ресурсів.

Отже, основною проблемою є відсутність інтелектуальних адаптивних систем автоматичного керування, здатних у реальному часі підтримувати оптимальні параметри температури та вологості в зоні зволоження, що є необхідною умовою підвищення якості продукції при мінімальних витратах енергії. Це зумовлює необхідність розробки дворівневої системи керування, де нижній рівень забезпечує стабілізацію тепловологого режиму, а верхній — оптимізує параметри з урахуванням динамічних змін і зовнішніх збурень для досягнення високих якісних характеристик хліба та енергоефективності виробництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В умовах зростаючої актуальності автоматизації процесів теплової обробки у хлібопекарській галузі у науково-технічній літературі представлено низку сучасних рішень. Зокрема, Беспалюк Д. С. і Підтиченко О.В. запропонували мікропроцесорну систему керування, яка реалізує автоматизоване регулювання температури на окремих ділянках печі, співвідношення газоповітряної суміші в пальниках, етапів продувки, запалювання, зупинки, а також забезпечує контроль полум'я й інтеграцію з іншими контролерами в єдину систему управління технологічним процесом [1]. Максимчук Ю. С. і Чепюк Л. О. розробили автоматизовану систему управління тунельною піччю на основі мікропроцесорного контролера, що забезпечує автоматичне та дистанційне керування виконавчими механізмами згідно з алгоритмом, сформованим на робочому місці оператора [2]. Компанія Ten24 запропонувала систему автоматичного керування випіканням, що здійснює контроль подачі пари і оптимізує вологість середовища впродовж усього циклу термообробки [3]. Хорольський В. П., Копайгора О. К. та співавтори провели ідентифікацію та моделювання впливу технологічних змінних у виробництві хліба, розробивши інтелектуальну систему керування енергоспоживанням, що оптимізує роботу локальних енергетичних установок на стадіях вистоювання і випікання, з урахуванням вартості електроенергії та якості продукції [4].

Групою компанії КМБП реалізовано мікропроцесорну систему автоматичного керування, яка підтримує задані температурні режими в пекарній камері, контролює тривалість випікання, а також автоматизує подачу пари для зволоження тістових заготовок [5]. Кирилов К. О. та Левінський В. М. розробили спосіб автоматичного керування випіканням із вимірюванням вологості та температури в зоні зволоження і двох зонах випікання, автономним регулюванням температури через зміну подачі продуктів згоряння та керуванням вологості парою, що забезпечує незалежність контурів регулювання і підвищує стабільність процесу [6]. Паньков Д. В. і Кишенько В. Д. за-

пропонували інтелектуальне керування на основі кваліметричних моделей, включаючи вимірювання технологічних параметрів (температури, вологості, пропеченості м'якуша, геометрії виробу), автоматичну ідентифікацію якості та оптимізацію технологічного режиму шляхом корекції подачі пари, витрат продуктів згоряння і швидкості руху поду [7]. Воїнова С. О. та Сібірченко О. С. розробили метод автоматичного керування із незалежним регулюванням температури в двох зонах пекарної камери та вологості в зоні зволоження через зміну подачі енергоносія і пари, що дозволяє уникнути перехресного впливу між зонами і підвищити точність підтримання параметрів [8].

У контексті підвищення точності, автономності та інтелектуальності систем керування, Павлов А. І. і Бабський О. В. запропонували спосіб регулювання температури в зоні випікання з коригуванням за сумарним впливом ПД-складових відхилень розрідження в топці, що підвищує стабільність температурного режиму [9]. Воїнова С. О., Світий І. М. та інші розробили метод незалежного регулювання температури та вологості із компенсацією взаємного впливу контурів, що зменшує перехресний вплив [10]. Світий І. М. і Миронова О. В. впровадили каскадну структуру керування, що забезпечує регулювання температури камери, готового виробу, витрати пари та розрідження в топці з підвищеною точністю компенсації збурень [11]. Аналогічно, Світий І. М. і Ківалов Ю. Г. запропонували метод інваріантного керування температурними каналами трьох зон печі для усунення взаємного впливу контурів [12]. Мітєва А. В. підкреслила важливість інваріантності каналів регулювання температури та вологості для стабільності режимів при змінах у паровій магістралі [13].

Незважаючи на наявність численних патентованих технічних рішень автоматичного керування випіканням [14–17], у відкритих джерелах обмежена інформація про їх ефективність з точки зору адаптивності, оптимізації та енергоефективності. Це обумовлює необхідність подальших досліджень, спрямованих на вдосконалення методів автоматизованого керування з урахуванням динамічних властивостей об'єкта та змін зовнішніх умов.

Особливу увагу заслуговують дворівневі системи автоматичного керування. Зокрема, Бевз В. І. запропонував ієрархічну структуру, де нижній рівень реалізує регулювання основних параметрів процесу випікання, а верхній – оптимізатор, що формує завдання регуляторам шляхом розв'язання задачі нелінійного програмування з метою мінімізації енергоспоживання без втрати якості [18]. Недостатній рівень керування вологістю в більшості наявних систем негативно впливає на стабільність якості хліба, адже саме тепловологий режим зони зволоження визначає формування структури, об'єму, кірки та аромату виробу. Параметри зволоження враховуються фрагментарно, без цілеспрямованої оптимізації, тоді як основна увага зосереджена на температурі, витратах палива та швидкості конвеєра. Керування вологістю здебільшого відсутнє або має компенсаційний характер, що не гарантує стабільної якості за змін умов. Оптимізацію слід здійснювати не лише за кінцевими показниками якості, а й безпосередньо в координатах тепловологого режиму зони зволоження. Це обґрунтовує необхідність реалізації дворівневої системи керування, де нижній рівень відповідає за стабілізацію параметрів середовища, а верхній — за формування оптимальних задач з урахуванням властивос-

тей тіста, енергетичних збурень та цільових характеристик продукції при мінімальному енергоспоживанні.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є формалізація об'єкта керування процесом тепловологової обробки тістових заготовок у хлібопекарській печі, параметризація впливових технологічних змінних та обґрунтування доцільності впровадження оптимізуючого рівня в структуру системи автоматичного керування.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** У дослідженні процес випікання хліба розглядається як багатопараметрична система з вираженою динамікою тепловологого режиму в зоні зволоження (рис. 1). Для побудови моделі об'єкта керування використано метод системного аналізу, а також методики активного й пасивного експерименту, статистичної ідентифікації та інженерного узагальнення. Синтез САР виконано з використанням методів класичної теорії автоматичного керування, включно з оптимальним параметричним налаштуванням регуляторів. Перевірку працездатності алгоритмів здійснено шляхом імітаційного моделювання.

Як показано на Рисунку 1, у процесі випікання відбувається пошарове прогрівання тістової заготовки, що супроводжується комплексом фізичних, біохімічних і колоїдних перетворень. Така структура тепломасообміну ускладнює задачу стабілізації параметрів середовища. Це обумовлює доцільність реалізації дворівневої системи керування: нижній рівень забезпечує підтримання температури та вологості, тоді як верхній рівень формує оптимальні завдання з урахуванням змін технологічних умов і впливу збурень.

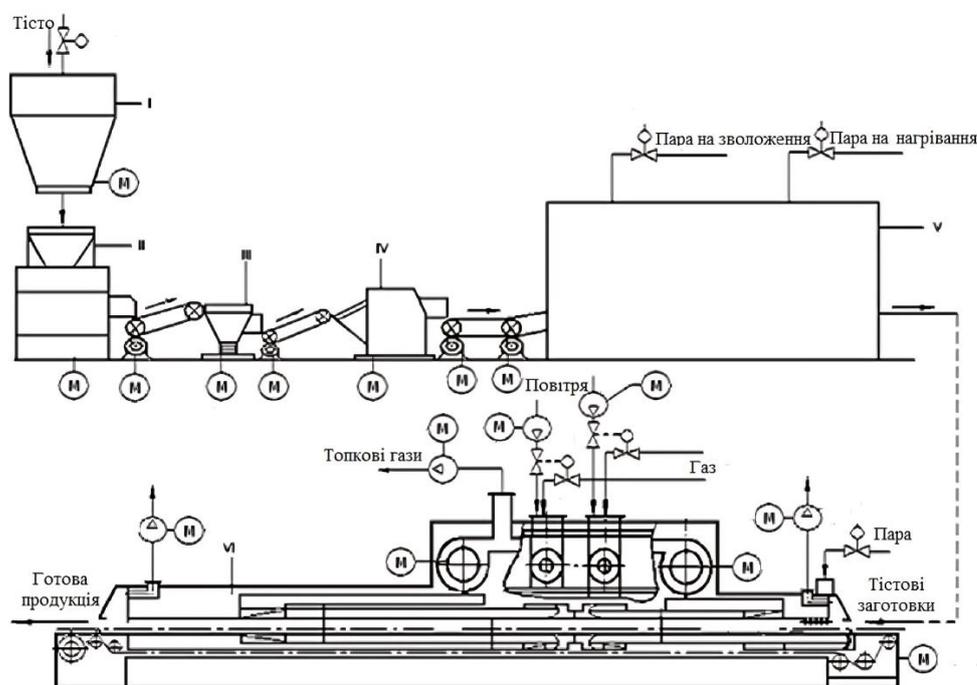


Рисунок 1 – Схема ділянки технологічного процесу випікання хліба

Хлібобулочні вироби випікаються в пекарських камерах за температури 200–280 °С при витраті теплової енергії на рівні 293–544 кДж на 1 кг продукції. Основна частина теплоти (80–85 %) передається заготовці випромінюванням, решта — тепло-

провідністю від поду і конвекцією пароповітряної суміші. Основні етапи термофізичних перетворень включають нагрівання заготівлі до 96–97 °С, що забезпечує її перехід у хліб. Конденсація пари в зоні зволоження пришвидшує прогрів, затримує утворення кірки, сприяє розширенню виробу та формуванню блискучої, щільної поверхні. Для посилення зволоження тістові заготівлі зазвичай обприскують водою перед посадкою, а зона поду повинна бути розігріта до 180–200 °С. У зоні високих температур (270–290 °С) відбувається інтенсивне розширення заготівлі внаслідок переходу летких речовин у парову фазу та формування стабільної структури виробу через клейстеризацію крохмалю й денатурацію білків. Технологічна схема виробництва хліба охоплює послідовну механізовану обробку тіста, починаючи з його подачі з бункера (I) до завершального етапу випікання в пекарській печі (VI). Зокрема, тісто надходить у тістодільну машину (II), де відбувається його порціонування. Далі за допомогою транспортера заготівлі переміщуються до округлювача (III), що надає їм оптимальної форми. Після округлення тістові заготовки спрямовуються до тістоформувальної машини (IV), яка забезпечує остаточну геометрію виробу відповідно до заданого типу продукції. Сформовані заготовки надходять до вистійної шафи (V), де проходять попереднє вистоювання з метою активізації дріжджових процесів, що забезпечує оптимальну пористість м'якуша. Фінальне вистоювання та термічна обробка відбуваються у хлібопекарській печі (VI), де завершуються всі фізико-хімічні трансформації: утворення м'якуша, формування кірки, фіксація об'єму та розвиток аромату. Така схема дозволяє досягти стабільної якості продукції при зниженні ручної праці та забезпеченні контролю технологічних параметрів на кожному етапі. Об'єктом дослідження є піч Г4-ПХЗС-25, пекарна камера якої утворена чотирма послідовно розташованими корпусами-секціями (Рис.2). Вони поєднані системою газоходів, призначених для подачі гріючих газів – теплоносія, що надходить від топкових пристроїв. Кожна секція обладнана пристроєм зволоження пароповітряного середовища, що забезпечує формування необхідного мікроклімату у відповідній зоні. Піч має дві незалежні теплові зони з роздільним регулюванням температури та вологості. Принцип дії полягає в теплопередачі від топків через газоходи до пекарної камери, де переміщується сітчастий конвеєр із тістовими заготівками. Важливою особливістю є рециркуляція відпрацьованих гріючих газів із першої зони до другої, що підвищує теплову ефективність системи.

Під режимом випікання розуміють сукупність параметрів температури, вологості та часу, що задаються для окремих зон камери. У сучасній практиці застосовуються змінні температурно-вологісні режими, що передбачають проходження заготовки через декілька технологічних зон: зволоження, високої температури та охолодження. У зоні зволоження підтримується висока відносна вологість (65–90 %) і відносно низька температура (120–160 °С), що створює умови для конденсації пари на поверхні заготовок, запобігає передчасному утворенню кірки та сприяє рівномірному прогріванню виробу.

Наступним етапом дослідження стало вивчення впливу режимів функціонування обладнання на техніко-економічні показники процесу, зокрема –

на якість готової продукції, витрати енергоносіїв та ресурсну ефективність. Для цього проведено параметризацію технологічної схеми випікання хліба (Рис. 2), що дозволило ідентифікувати критичні зони впливу режимів роботи на стабільність процесу.

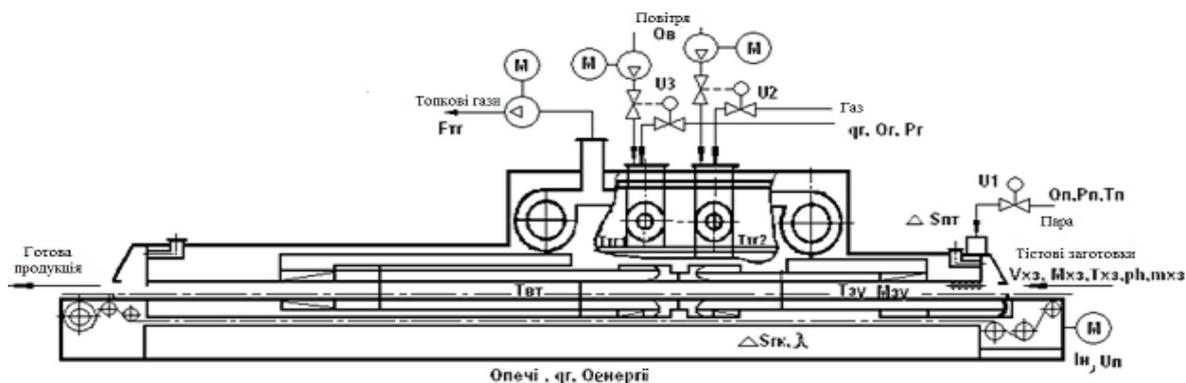


Рисунок 2 – Параметризована схема технологічного процесу випікання хлібу в печі Г4-ПХЗС-25

У рамках дослідження виконано також аналіз чинних регламентів та можливих наслідків їх порушення – зокрема, перегріву у зонах випікання, зниження вологості у зоні зволоження, або нестабільної швидкості руху пода. Побудована модель технологічної схеми дозволяє здійснювати адаптивне управління параметрами процесу та виявляти оптимальні умови для забезпечення високої якості хлібобулочних виробів при мінімізації витрат енергії та зниженні відсотка браку. До технологічного регламенту віднесли вологість  $M_{зy}$  та температуру  $T_{зy}$  у зоні зволоження; температуру у зоні високої температури  $T_{вт}$ ; температуру у зоні зниженої температури  $T_{пт}$ . До експлуатаційного регламенту - струм навантаження транспортера печі  $I_n$  та напругу, підведену до електродвигуна транспортера печі  $U_{п}$ . До техніко-економічного - продуктивність печі  $Q_{печі}$ ; питомі витрати палива (природного газу)  $q_r$ ; кількість електрики  $Q_{енергії}$ , що витрачається. До екологічного регламенту – концентрацію шкідливих речовин у топкових газах, викиданих трубами печі внаслідок її роботи. На техніко-економічні показники процесу випікання, а також на регламентацію режимів його ведення суттєвий вплив мають вимоги, викладені в правилах експлуатації хлібопекарської печі Г4-ПХЗС-25:

1) Під час експлуатації печі здійснюється безперервний контроль параметрів повноти згоряння палива, температурного режиму гріючих газів і пекарної камери, а також тиску пари в системі. Забезпечення стабільних значень цих параметрів є критичним для підтримання ефективності та безпеки технологічного процесу.

2) Експлуатація печі з порожньою (незавантаженою) пекарною камерою вважається небезпечною через відсутність тепловіддачі від нагрітих трубок до виробів, що може спричинити надмірне підвищення тиску в трубках і ризик їх механічного руйнування. Допускається лише короточасна робота топки за відсутності завантаження. У випадку тривалого незавантаження пекарної камери подача палива в топку має бути припинена [4]. На підставі цих вимог було складено таблицю регламентів (табл. 1).

Регламенти ведення технологічного процесу та експлуатації обладнання

Найменування параметрів	Номинальне значення	Допустимі відхилення від номіналу		
		Тривалі ( $t \rightarrow \infty$ )		Короткочасні ( $0 < t < \infty$ )
		величина	величина	час, з
Вологість середовища, у зоні зволоження печі $M_{зв}$ , %	85	0.5	10	900
Температура середовища у зоні зволоження печі $T_{зв}$ , °C	140	1	30	900
Температура середовища у зоні випічки високої температури ТВТ, °C	280	2	40	900

При недотриманні регламенту хлібні заготовки зазнають змін, що стосуються як зовнішнього вигляду, так і смакових якостей випіканого виробу. Ці зміни, викликані виходом регульованих параметрів під час випікання за зону неважливих відхилень, зведено в Табл. 2.

Таблиця 2

Таблиця змін наслідків виходу регламентних значень за допустимі зони

Найменування параметра	Номинальне значення	Наслідки перевищення допустимого значення	Наслідки зниження нижче допустимого значення
Вологість середовища у зоні зволоження, $M_{зв}$ , %	85	Деформація тістової заготовки (ТЗ), розриви кірки, порушення структури м'якуша	Передчасне утворення кірки, обмеження розширення ТЗ, зниження пористості готового виробу
Температура середовища у зоні зволоження, $T_{зв}$ , °C	140	Надмірно швидке збільшення об'єму ТЗ, розриви кірки, вихід м'якуша за межі виробу	Недостатнє підняття ТЗ, деформація, зростання ризику дефектів у зоні високої температури
Температура у зоні високої температури, ТВТ, °C	280	Прискорене утворення кірки, надмірна її товщина, деформація виробу	Нерівномірне забарвлення кірки, сирий м'якуш у центральній частині ТЗ

Усі зазначені вище наслідки виходу регламенту за зазначені межі призводять, до випуску бракованої продукції, що за собою веде економічні та енергетичні збитки, ускладнення торгово-економічних і конкурентних відносин з ринком виробника. Зазвичай, поточні значення нормативних параметрів завжди відхиляються від номінальних

внаслідок зміни умов, у яких ведеться процес. Ці умови також характеризуються певними параметрами та можуть бути згруповані за деякими ознаками. До сировинних параметрів віднесли вологість хлібних заготовок  $M_{хз}$ , їх об'єм  $V_{хз}$ , температуру  $T_{хз}$ , кислотність  $ph_{хз}$ , масу  $m_{хз}$ . До енергетичних - витрату пари, що підводиться в зону зволоження печі  $Q_{п}$ , її тиск  $P_{п}$ , температуру  $T_{п}$ , витрату газу, що підводиться до двох топок печі  $Q_{г}$ , його тиск  $P_{г}$ ; питому теплоту згоряння газу в топці  $q_{г}$ , витрату повітря, що підводиться до топок печі  $Q_{ст}$ . До механічних - зміну поперечного перерізу гріючого каналу внаслідок відкладення сажі та золи  $\Delta S_{гк}$ , зміну поперечного перерізу в трубі, що підводить пару в зону зволоження  $\Delta S_{пт}$ , зміну коефіцієнта теплопередачі пода і гріючих каналів  $\Delta \lambda$ , керуючий вплив  $u_1$  - положення регулюючого органу подачі пари в зону зволоження, керуючий вплив  $u_2$  - положення регулюючого органу подачі газу в першу топку, керуючий вплив  $u_3$  - положення регулюючого органу подачі газу в другу топку печі.

Ефективність регулювання в процесі випікання хліба істотно залежить від стабільності умов ведення технологічного процесу. Через динамічні збурення змінюються оптимальні значення керованих параметрів, що зумовлює дрейф критеріїв якості продукції. У зв'язку з цим доцільним є вдосконалення системи керування шляхом введення функції оптимізації, яка дозволить адаптивно коригувати режими випікання. Ключовими для забезпечення високої якості хлібобулочних виробів є параметри зони зволоження пекарної камери – вологість і температура. Саме в цій зоні формуються основні структурні характеристики м'якуша та кірки. Зволоження сповільнює утворення твердої кірки, сприяє рівномірному розширенню тістової заготовки, зменшує інтенсивність випаровування на початковому етапі, що позитивно впливає на зовнішній вигляд і пористість готового виробу. Конденсація пари на поверхні забезпечує стабілізацію форми за рахунок теплової енергії.

Дослідження показують, що процес випікання умовно поділяється на два періоди – розширення (змінного об'єму) та стабілізації (постійного об'єму), після якого можливе незначне зменшення об'єму виробу внаслідок усадки кірки під час зневоднення. З огляду на це, підтримання стабільного тепловологісного режиму в зоні зволоження має пріоритетне значення, тоді як у зоні високих температур достатньо температурного контролю. Раціональним підходом до підвищення ефективності керування є реалізація дворівневої системи: на першому рівні забезпечується регулювання базових параметрів (температури, вологості, тиску), а на другому – здійснюється оптимізація тепловологісного режиму в зоні зволоження з урахуванням змінних умов процесу та зовнішніх збурень. Це дозволяє забезпечити стабільну якість готової продукції при підвищенні енергоефективності виробництва.

З метою стабілізації вологісного режиму в зоні зволоження пекарної камери запропоновано використати ПІ-регулятор, який описується рівнянням:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де  $u(t)$  – регулюючий вплив (відкриття клапану подачі пари);  $e(t) = M_{\text{зад}}(t) - M_{\text{факт}}(t)$  – відхилення вологості;  $K_p, K_i$  – коефіцієнти пропорційної та інтегральної дії;  $M_{\text{зад}}(t), M_{\text{факт}}(t)$  – відповідно задана та фактична вологість.

Адаптивність забезпечується залежністю коефіцієнтів регулятора від температури технологічної зони:

$$K_p = f(T_{\text{зон}}), \quad K_i = g(T_{\text{зон}}), \quad (2)$$

Такий підхід забезпечує динамічну адаптацію параметрів регулятора до змін технологічного середовища без необхідності втручання оператора. Залежність коефіцієнтів пропорційної та інтегральної дії від температури у зоні обробки дозволяє компенсувати вплив внутрішніх і зовнішніх збурень у режимі реального часу, що істотно підвищує точність підтримання заданих умов. З огляду на це, описана структура регулятора може розглядатися як фундаментальна основа для побудови ієрархічної системи автоматичного керування, в якій нижній рівень виконує функції стабілізації, а верхній реалізує оптимізаційні алгоритми з урахуванням змінних властивостей об'єкта та багатокритеріальних вимог до якості кінцевого продукту.

Для ілюстрації функціонування запропонованої регуляторної структури було реалізовано імітаційну модель процесу стабілізації вологості в зоні зволоження. На рисунку 4 наведено характер перехідного процесу за дії ПІ-регулятора, що забезпечує вихід поточного значення вологості на задане з урахуванням інерційних властивостей об'єкта керування. Модель демонструє ефективність запропонованого підходу: при початковому відхиленні на рівні 10% від номінального значення система досягає стабільного режиму менш ніж за 60 секунд, без перерегулювання або коливань, що свідчить про адекватність обраних параметрів регулятора.

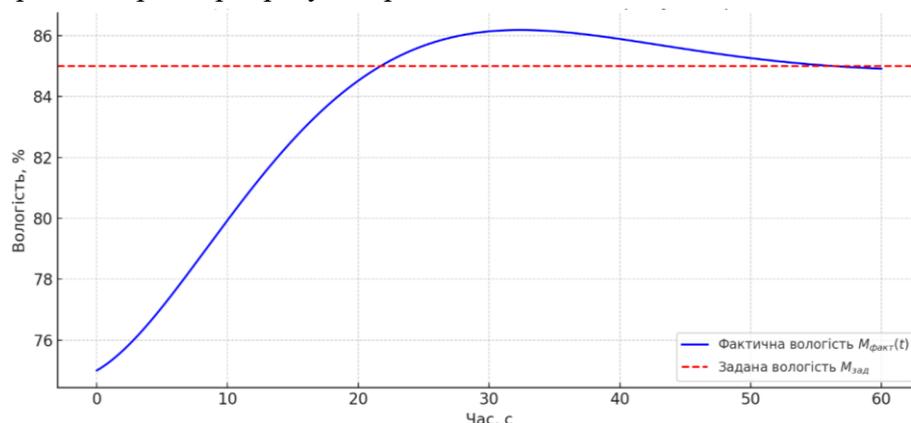


Рисунок 4 – Динаміка стабілізації вологості у зоні зволоження за дії ПІ-регулятора

**Висновки.** У роботі проведено системний аналіз процесу автоматизації випікання хліба на прикладі тунельної печі Г4-ПХЗС-25, зосереджено увагу на параметризації тепловологого режиму, що є ключовим для забезпечення стабільної якості хлібобулочних виробів. Визначено, що недостатній контроль вологості у зоні зволоження є однією з основних причин нестабільності якості та підвищеного енергоспоживання. Запропоновано дворівневу систему автоматичного керування, де нижній рівень забезпечує стабілізацію базових технологічних параметрів, а верхній – адаптивну оптимізацію теплово-

логого режиму з урахуванням динамічних змін технологічних властивостей тіста і зовнішніх збурень.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Беспалюк Д. С., Підтиченко О. В. Автоматизована система управління піччю для випікання хлібобулочних виробів [Електронний ресурс] // Екологічна безпека та раціональне природокористування: зб. матеріалів Всеукр. наук. конф. здобувачів вищої освіти та молодих учених, Житомир, 16 лютого 2023 р. – Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/02/388.pdf>
2. Максимчук Ю. С., Чепюк Л. О. Автоматизована система управління піччю для випікання хлібобулочних виробів [Електронний ресурс] // Екологічна безпека та раціональне природокористування: зб. матеріалів Всеукр. наук. конф. здобувачів вищої освіти та молодих учених, Житомир, 23 травня 2018 р. – Режим доступу: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/05/186-1.pdf>
3. Тунельні печі в хлібопекарській промисловості [Електронний ресурс] // Офіційний сайт компанії TEN24. – Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/blog/tunnelnye-pechi-v-khlebopekarskoj-promyshlennosti-chast-1/>
4. Хорольський В. П., Копайгора О. К., Гавришкевич Ю. С., Бойченко А. О. Система оптимального управління енергоспоживанням виробництва хліба [Електронний ресурс] // Вісник Хмельницького національного університету. – 2020. – № 1 (281). – С. 269–278. – Режим доступу: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/44-3.pdf>
5. Піч хлібопекарська [Електронний ресурс] // Офіційний сайт Калинівського машинобудівного заводу. – Режим доступу: <https://www.kmbp.com.ua/produktsiya/rishennia-dlia-khlebopekarskoj-promyslovosti/pechi-khlebopekarski>
6. Кирилов К. О., Левінський В. М. Спосіб автоматичного керування процесом випічки хліба : пат. № 79307 У Україна. МПК А21В1/00. № u201207355 ; заявл. 18.06.2012 ; опубл. 25.04.2013, Бюл. № 8.
7. Паньков Д. В., Кишенько В. Д. Спосіб інтелектуального керування процесом випічки подового хліба на основі кваліметричних моделей : пат. № 103533 У Україна. МПК А21В1/00, А21D8/06. № u201504955 ; заявл. 21.05.2015 ; опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24.
8. Воїнова С. О., Сібірченко О. С. Спосіб автоматичного управління випічкою хліба : пат. № 92208 У Україна. МПК А21В1/00. № u201400534 ; заявл. 20.01.2014 ; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15.
9. Павлов А. І., Бабський О. В. Спосіб автоматичного управління процесом випічки хліба : пат. № 75652 У Україна. МПК А21В1/00. № u201206097 ; заявл. 21.05.2012 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 23.
10. Воїнова С. О., Світий І. М., Рябокони М. О. Спосіб автоматичного керування процесом випічки хлібобулочних виробів : пат. № 72564 У Україна. МПК А21В1/00. № u201200467 ; заявл. 16.01.2012 ; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 16.
11. Світий І. М., Миронова О. В. Спосіб автоматичного управління піччю для виробництва хлібопекарних та кондитерських виробів : пат. № 62992 У Україна. МПК А21В1/00. № u201101939 ; заявл. 18.02.2011 ; опубл. 26.09.2011, Бюл. № 18.

12. Світий І. М., Ківалов Ю. Г. Спосіб автоматичного керування процесом випічки хліба : пат. № 50471 У Україна. МПК А21В1/00. № u200913008 ; заявл. 14.12.2009 ; опубл. 10.06.2010, Бюл. № 11.
13. Мітєва А. В. Спосіб автоматичного керування процесом випічки хліба : пат. № 34308 У Україна. МПК А21В1/00. № u200802052 ; заявл. 18.02.2008 ; опубл. 11.08.2008, Бюл. № 15.
14. Хорольський В. П., Ключєв Д. Ю., Коржов С. М. Інтелектуальна система управління та моніторингу робочих характеристик технологічного обладнання хлібобулочних заводів // Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. – 2016. – № 6. – С. 55–62.
15. Інтелектуальні системи управління виробництвом хлібобулочних виробів / В. П. Хорольський, Ю. М. Кореноць, А. В. Возняк [та ін.] ; за ред. В. П. Хорольського. – Кривий Ріг : ФОП Чернявський Д. О., 2019. – 204 с.
16. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості : підручник / А. П. Ладанюк, В. Г. Трегуб, І. В. Ельперін, В. Д. Цюцюра. – К. : Аграрна освіта, 2001. – 224 с.
17. Шаруда С. С., Кишенько В. Д. Інтелектуальна система сценарного управління хлібопекарським виробництвом // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2010. – № 5/3 (47). – С. 66–70.
18. Бєвз В. І. Автоматическая оптимизация процесса выпечки хлебобулочных изделий в современных хлебобулочных печах тоннельного типа : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.07 / Бєвз Владимир Ильич ; Одесская академия пищевой промышленности. – Одесса, 1980. – 185 с.

#### REFERENCES

1. Bєspaliuk D. S., Pidtychenko O. V. Avtomatyzovana systema upravlinnia pichchiu dlia vypikannia khlibobulochnykh vyrobiv [Elektronnyi resurs] // Ekolohichna bezpeka ta ratsionalne pryrodokorystuvannia: zb. materialiv Vseukr. nauk. konf. zdobuvachiv vyshchoi osvity ta molodykh uchenykh, Zhytomyr, 16 liutoho 2023 r. – Rezhym dostupu: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/02/388.pdf>
  2. Maksymchuk Yu. S., Chepiuk L. O. Avtomatyzovana systema upravlinnia pichchiu dlia vypikannia khlibobulochnykh vyrobiv [Elektronnyi resurs] // Ekolohichna bezpeka ta ratsionalne pryrodokorystuvannia: zb. materialiv Vseukr. nauk. konf. zdobuvachiv vyshchoi osvity ta molodykh uchenykh, Zhytomyr, 23 travnia 2018 r. – Rezhym dostupu: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2018/05/186-1.pdf>
  3. Tunelni pechi v khlibopekarskii promyslovosti [Elektronnyi resurs] // Ofitsiyni sait kompanii TEN24. – Rezhym dostupu: <https://ten24.com.ua/ua/blog/tunnelnye-pechi-v-khlibopekarskoj-promyshlennosti-chast-1/>
  4. Khorolskyi V. P., Kopaihora O. K., Havryshkevych Yu. S., Boichenko A. O. Systema optymalnogo upravlinnia enerhospozhyvanniam vyrobnytstva khliba [Elektronnyi resurs] // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnogo universytetu. – 2020. – № 1 (281). – С. 269–278. – Rezhym dostupu: <http://journals.khnu.km.ua/vestnik/wp-content/uploads/2021/01/44-3.pdf>
  5. Pich khlibopekarska [Elektronnyi resurs] // Ofitsiyni sait Kalynivskoho mashyno-
- ISSN 1562-9945 (Print) 55  
ISSN 2707-7977 (Online)

budivnoho zavodu. – Rezhym dostupu: <https://www.kmbp.com.ua/produktsiya/rishennia-dlia-khlibopekarskoi-promyslovosti/pechi-khlibopekarski>

6. Kyrylov K. O., Levynskyi V. M. Sposib avtomatychnoho keruvannia protsesom vypichky khliba : pat. № 79307 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u201207355 ; zaiavl. 18.06.2012 ; opubl. 25.04.2013, Biul. № 8.

7. Pankov D. V., Kyshenko V. D. Sposib intelektualnogo keruvannia protsesom vypichky podovoho khliba na osnovi kvalimetrychnykh modelei : pat. № 103533 U Ukraina. MPK A21B1/00, A21D8/06. № u201504955 ; zaiavl. 21.05.2015 ; opubl. 25.12.2015, Biul. № 24.

8. Voinova S. O., Sibirchenko O. S. Sposib avtomatychnoho upravlinnia vypichkoiu khliba : pat. № 92208 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u201400534 ; zaiavl. 20.01.2014 ; opubl. 11.08.2014, Biul. № 15.

9. Pavlov A. I., Babskyi O. V. Sposib avtomatychnoho upravlinnia protsesom vypichky khliba : pat. № 75652 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u201206097 ; zaiavl. 21.05.2012 ; opubl. 10.12.2012, Biul. № 23.

10. Voinova S. O., Svityi I. M., Riabokon M. O. Sposib avtomatychnoho keruvannia protsesom vypichky khlibobulochnykh vyrobiv : pat. № 72564 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u201200467 ; zaiavl. 16.01.2012 ; opubl. 27.08.2012, Biul. № 16.

11. Svityi I. M., Myronova O. V. Sposib avtomatychnoho upravlinnia pichchiu dlia vyrobnytstva khlibopekarnykh ta kondyterskykh vyrobiv : pat. № 62992 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u201101939 ; zaiavl. 18.02.2011 ; opubl. 26.09.2011, Biul. № 18.

12. Svityi I. M., Kivalov Yu. H. Sposib avtomatychnoho keruvannia protsesom vypichky khliba : pat. № 50471 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u200913008 ; zaiavl. 14.12.2009 ; opubl. 10.06.2010, Biul. № 11.

13. Mitieva A. V. Sposib avtomatychnoho keruvannia protsesom vypichky khliba : pat. № 34308 U Ukraina. MPK A21B1/00. № u200802052 ; zaiavl. 18.02.2008 ; opubl. 11.08.2008, Biul. № 15.

14. Khorolskyi V. P., Kliuiev D. Yu., Korzhov S. M. Intelektualna systema upravlinnia ta monitorynhu robochykh kharakterystyk tekhnolohichnoho obladnannia khlibobulochnykh zavodiv // Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky. – 2016. – № 6. – S. 55–62.

15. Intelektualni systemy upravlinnia vyrobnytstvom khlibobulochnykh vyrobiv / V. P. Khorolskyi, Yu. M. Korenots, A. V. Vozniak [ta in.] ; za red. V. P. Khorolskoho. – Kryvyi Rih : FOP Cherniavskyi D. O., 2019. – 204 s.

16. Avtomatyzatsiia tekhnolohichnykh protsesiv i vyrobnytstv kharchovoi promyslovosti : pid-ruchnyk / A. P. Ladaniuk, V. H. Trehub, I. V. Elperin, V. D. Tsiutsiura. – K. : Ahrarna osvita, 2001. – 224 s.

17. Sharuda S. S., Kyshenko V. D. Intelektualna systema stsenarnoho upravlinnia khlibopekarskym vyrobnytstvom // Skhidno-Yevropeyskyi zhurnal peredovykh tekhnolohii. – 2010. – № 5/3 (47). – S. 66–70.

18. Bevz V. I. Avtomatyzatsiia optymyzatsiia protsesa vyrechky khlebobulochnykh yzdelyi v sovremennykh khlebobulochnykh pechakh tunnelnoho typu : dys. ... kand. tekhn.

***A systemic approach to bread baking automation based  
on control object parameterization***

*Current studies on the automation of bread baking processes reveal significant limitations in existing control systems, particularly due to the insufficient consideration of humidity regulation in the steam zone of the baking chamber. While modern systems tend to focus on temperature control, fuel consumption, and conveyor speed, they often overlook the key role of moisture in ensuring high-quality end products. Numerous technical and scientific works propose temperature and process control solutions; however, few provide integrated approaches addressing the heat and humidity balance. There is also limited information available on the practical performance of such systems, especially in terms of adaptability and energy efficiency. The need for intelligent, adaptive, and energy-saving systems remains largely unmet in industrial bakery environments.*

*This study aims to enhance the effectiveness of the bread baking process by designing a two-level automatic control system. The lower level ensures stable regulation of environmental parameters, while the upper level focuses on optimizing the heat and humidity conditions in the steam zone, accounting for dynamic dough properties and external disturbances.*

*The paper presents a detailed analysis of the G4-PKhZS-25 tunnel baking oven as the control object. The process is viewed as a complex, multi-parameter system where consistent thermal and humidity conditions are critical. Through system analysis and experimental identification, key influencing parameters are defined and formalized. The proposed two-level structure includes a feedback-based bottom level for stabilization and a model-based top level for optimization. The study develops a parameterized model of the baking process, identifying the critical zones of technological influence. It highlights the influence of steam moisture and temperature on crust formation, dough expansion, and product porosity. Engineering models and simulation approaches are used to validate the proposed control strategy. Emphasis is placed on the stability of quality indicators and energy consumption under varying process conditions.*

*The research concludes that traditional single-layer control systems are insufficient for achieving the desired stability and quality in bread production. The study proposes a two-level control framework where the lower level ensures baseline environmental control and the upper level applies adaptive optimization to maintain optimal heat and humidity conditions in the steam zone. The approach contributes to consistent product quality, energy savings, and reduced defect rates. It also lays the groundwork for future development of intelligent control systems in industrial bakery applications.*

**Колосовський Артем Іванович** - аспірант, Одеський національний технологічний університет, Одеса, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4162-629X>

**Kolosovskyi Artem** - Postgraduate Student, Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-4162-629X>

І.М. Гвоздева, В.Ф. Миргород, Б.В. Жеков, О.М. Єрмошкін, Г.П. Грама  
**ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ДАТЧИКА TRO  
ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ БАЛАСТНИХ ВОД**

*Анотація. З метою аналізу антропогенного впливу на екологію водних систем здійснено порівняльний аналіз методів і технологій, які застосовуються для очищення баластних вод на борту суден. Надійність роботи датчиків TRO (загального залишкового окислювача), які входять до складу суднової системи очищення баластних вод (СОБВ), залишається недостатньо високою, що обумовило проведення експериментальних досліджень їх характеристик під час експлуатації СОБВ Electro-Cleen™ System в усіх режимах її експлуатації (баластування, дебаластування та стрипінгу). Для підвищення надійності роботи СОБВ запропонована нова структура системи автоматичного управління, яка включає додатковий контур автоматичного корегування значень датчика TRO за допомогою PLC. Програмування додаткового PLC здійснене із застосуванням програмного забезпечення ALPHA PROGRAMMING.*

*Ключові слова. Система очищення баластних вод, датчик загального залишкового окислювача, система автоматичного управління, програмований логічний контролер, дебаластування*

**Постановка проблеми.** Баластні системи є одними з основних суднових систем, які призначені для забезпечення остійності судна шляхом прийому та відкачування баластних вод у баластні танки. Під час здійснення операцій баластування/дебаластування відбувається забір/скидання баластних вод та осадів у акваторіях морів та океанів. Баластні води та осадки містять велику кількість бактерій, рослин і тварин, які можуть виживати в життєздатній формі на протязі кілька тижнів, що сприяє їх перенесенню у водні системи інших регіонів. При потраплянні в басейни морів або в водні потоки, ці організми можуть створювати небезпеку для навколишнього середовища, здоров'я людей, майна або ресурсів, погіршувати біологічне розмаїття та ін. Зростаючий сумарний тоннаж світового торгового флоту, який скидає щорічно до 10 млрд тон водяного баласту, в якому мешкає понад 7 тисяч видів морських тварин, бактерій та рослин, змусив звернути пильну увагу на проблему, пов'язану з антропогенним впливом на екологію водних систем внаслідок розселення інвазійних видів мікроорганізмів із-за скидання баластних вод з суден у самих різних районах Світового океану [1,2]. Цей процес, в силу своєї непередбачуваності, отримав назву “екологічна рулетка” [3,4].

Зростаюче міжнародне значення проблеми перенесення морських організмів з водним баластом та можливість завдання шкоди морському середовищу призвело до

створення відповідних законодавчих документів, як на регіональних рівнях, так і на рівні ООН та International Maritime Organization (ІМО) [5, 6]. Відповідно до Міжнародної конвенції ІМО “Охорона і управління судновими баластними водами і осадами” [7] стало необхідним впровадження систем управління баластними водами і систем очищення баластних вод на борту суден. СОБВ є складними судновими інженерними комплексами, які складаються з багатьох підсистем, вимірювання у яких здійснюється за допомогою багатьох датчиків та вимірювальних каналів. Незважаючи на високий рівень автоматизації процесів, які відбуваються у СОБВ, надійність роботи деяких датчиків залишається недостатньо високою та вимагає дослідження їх характеристик під час експлуатації СОБВ.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Міжнародна конвенція про контроль суднових баластних вод й осадів та управління ними (BWM) [1] є ключовим міжнародним документом, що регулює питання запобігання забрудненню морського середовища судновими баластними водами. Міжнародна конвенція включає два основні правила, які визначають стандарти управління баластними водами: правило D-1 визначає стандарт обміну баластними водами, правило D-2 деталізує стандарт очищення баластних вод з використанням СОБВ [7–9]. У символіку класів суден, на яких здійснюється управління судновими баластними водами і осадами шляхом заміни баласту в морі, вноситься спеціальний знак BWM, що підтверджує їх відповідність міжнародним вимогам щодо безпечної заміни баласту в морі. Для суден, які не мають на борту систем безпечної заміни баласту в морі, заміна водяного баласту в морі забороняється. Зовсім небагато часу залишається до повної заборони експлуатації суден без наявності на них СОБВ [9–11]. Сучасні судна, відповідно до вимог ІМО, в обов'язковому порядку оснащуються СОБВ, а судна, що знаходяться в експлуатації, модернізуються шляхом встановлення цих систем.

Для очищення баластних вод на суднах застосовується багато різних методів та технологій [8, 12]. Найбільш дієвим та ефективним є метод, який полягає в об'єднанні різних технологій та уможливорює двоступеневе очищення і знезараження баластних вод до рівня стандарту D-2.

Обробка баластних вод на борту суден зазвичай проводиться у два етапи: твердо-рідинне розподілення та дезінфекція [13]:

1. Твердо-рідинне розділення: за допомогою фільтрації видаляються механічні домішки та великі організми.
2. Дезінфекція: знищення та/або деактивація мікроорганізмів різними методами, такими, як хімічна та/або фізико-хімічна інактивація (УФ-випромінювання (уф-промені), висока температура, кавітація), дезоксидація [9].

СОБВ є складними інженерними комплексами, що включають в себе різні компоненти. Враховуючи високий рівень автоматизації СОБВ, тобто насиченість різноманітними елементами (датчиками, виконавчими механізмами, лініями зв'язку тощо), їх сумарна надійність залишається недостатньо високою. Суворі морські умови, вібрація, вплив солоної води та інші фактори також можуть негативно впливати на надійність обладнання.

Для контролю відповідності очищеної води стандарту D-2 та ефективності роботи СОБВ використовується показник ТРО [10]. Концентрація ТРО вимірюється спеціальним датчиком, який визначає сумарний вміст дезінфікуючих речовин (хлору, діоксиду хлору) у воді. Точність та стабільність вимірювань ТРО може варіюватися під впливом різних факторів, таких, як тип та концентрація окислювача, температура та солоність води, наявність органічних речовин [11]. Ці фактори зумовлюють необхідність проведення досліджень, спрямованих на вдосконалення характеристик датчиків ТРО у складі СОБВ.

Значна більшість (89%) опитаних судновласників/операторів повідомили про проблеми, пов'язані зі збоями обладнання у системах обробки баластних вод (BWM) [15]. Це говорить про те, що надійність обладнання є серйозною проблемою при експлуатації таких систем. Наведемо неповний перелік відмов, що стосуються тільки блоку датчиків ТРО.

- Камера охолодження ТРО не працює.
- Пошкодження соленоїдного клапана коробки відбору проб ТРО.
- Засмічення зворотних клапанів ТРО.
- Несправність/відмова датчиків ТРО.
- Блок керування очищенням ТРО.
- Несправності датчиків ТРО, пов'язані з тиском в шафі, контролером очищення, зворотним клапаном, соленоїдними клапанами.
- Датчики ТРО, включаючи його систему відбору проб, проблема всмоктування бустерним насосом.
- Відмова реле датчика ТРО.
- Друкована плата ТРО пошкоджена.
- Нестабільні показання ТРО.
- Високі показання ТРО в ppm.
- Сигналізація високого рівня ТРО.
- Система відбору проб ТРО не працює.
- Некоректні показання ТРО через реагенти.
- Неможливість контролювати рівень ТРО при скиданні.
- Несправність зварювального насоса відбору проб ТРО.
- Датчик ТРО вийшов з ладу.
- Виявлено витік насоса дозування проб датчика ТРО.
- Пошкодження ТРО під тиском.
- Дефектний впускний соленоїдний клапан ТРО.
- Соленоїдний клапан датчика ТРО пошкоджений.

Наведений перелік демонструє низку відмов, які можуть виникнути у блоці датчиків ТРО в складі систем обробки баластних вод. Ці фактори зумовлюють необхідність досліджень, спрямованих на забезпечення на заданому рівні надійності датчиків ТРО та їх характеристик у складі СОБВ.

**Метою даної роботи** є аналіз роботи датчика ТРО (загального залишкового окислювача) в усіх режимах експлуатації системи очищення баластних вод Electro-Cleen™ System для забезпечення відповідності міжнародному стандарту D-2.

**Матеріали та методи дослідження** Викладення основного матеріалу дослідження. Для досягнення поставленої мети роботи досліджено СОБВ Electro-Cleen™ System (ECS), яка відповідає стандарту D-2. Робочі умови системи розраховані на продукування рівня ТРО від 1 мг/л до 10 мг/л. Система ECS має складну структуру та складається елементів, які представлені на рисунку 1.



Рисунок 1 – Елементи системи Electro-Cleen™ System:

- 1 – блок електричної камери; 2 – блок автоматичної нейтралізації;  
3 – обладнання для розподілу електроенергії; 4 – блок датчиків ТРО; 5 – комп'ютер управління; 6 – блок датчика провідності; 7 – витратомірний блок; 8 – датчик температури прісної води; 9 – Т-подібний фільтр

У системі очищення баластних вод Electro-Cleen™ System (рис. 1) використовується двоетапний метод: перший етап – фільтрація: видалення механічних домішок та великих організмів; другий етап – додавання в цю воду сильного окислювача, отриманого електролітичним шляхом.

При електролізі морської води відбуваються складні електрохімічні процеси, які призводять до утворення різних хімічних сполук, що використовуються для дезінфекції баластних вод. Розглянемо основні процеси, що відбуваються при електролізі морської води в системах очищення баластних вод.

### 1. Електроліз солоної води:

На катоді:  $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$  Вода відновлюється, утворюючи газоподібний водень ( $\text{H}_2$ ) та гідроксид-іони ( $\text{OH}^-$ ).

На аноді:  $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 4\text{H}^+ + \text{O}_2 + 4\text{e}^-$  Вода окислюється, утворюючи іони водню ( $\text{H}^+$ ), газоподібний кисень ( $\text{O}_2$ ) та вільні електрони ( $\text{e}^-$ ).

### 2. Утворення гіпохлориту:

Хлор-іони ( $\text{Cl}^-$ ), присутні в морській воді, окислюються на аноді:



Утворений хлор ( $\text{Cl}_2$ ) реагує з гідроксид-іонами ( $\text{OH}^-$ ), утворюючи гіпохлорит-іони ( $\text{OCl}^-$ ):



Гіпохлорит-іони ( $\text{OCl}^-$ ) є основним дезінфікуючим агентом, який знищує бактерії, віруси та інші мікроорганізми в баластній воді. Окиснення хлорид-іонів також призводить до утворення ефективної дезінфікуючої речовини – гіпохлориту.

### 3. Вплив рН:

рН морської води відіграє важливу роль у співвідношенні між різними формами активного хлору:

При  $\text{pH} < 7$  переважає гіпохлористина ( $\text{HClO}$ ) та хлорноватиста ( $\text{HClO}_3$ ) кислоти, які є більш ефективними дезінфікуючими агентами, ніж гіпохлорит-іон ( $\text{OCl}^-$ ).

При  $\text{pH} > 7$  переважає гіпохлорит-іон ( $\text{OCl}^-$ ).

Оптимальний рН для дезінфекції баластних вод зазвичай знаходиться в діапазоні 7-8.

У СОБВ Electro-Cleen™ System (ECS) енергія використовується для окиснення хлорид-іонів, що призводить до утворення ефективної дезінфікуючої речовини – гіпохлориту. Концентрація активних окислювачів, що утворюються при електролізі, повинна контролюватися для забезпечення ефективної дезінфекції та запобігання негативному впливу на навколишнє середовище. Ця концентрація залежить від напруги та струму в електролізері. Це дозволяє регулювати рівень TRO в автоматичному або ручному режимах, змінюючи співвідношення “напруга-струм”.

Надмірна концентрація окислювачів може бути шкідливою для морського середовища, тому необхідно суворо контролювати, щоб максимальна концентрація, яка вимірюється датчиком TRO у баластній воді, не перевищувала 10 мг/л (0,001%) [14].

СОБВ Electro-Cleen™ System має три основні режими роботи:

- Баластування: концентрація TRO має бути 6-10 мг/л.
- Дебаластування: концентрація TRO має бути  $< 1$  мг/л.
- Стріпінг: концентрація TRO має бути  $< 1$  мг/л.

В СОБВ ECS для вимірювання TRO використовується метод фотометрії з реагентом DPD (диметил-п-фенілендіаміном) для колориметричного визначення концентрації окислювача в баластній воді. Фотоколориметричний метод ґрунтується на взаємодії вимірюваної речовини (в даному випадку, хлору) з реагентом. Внаслідок цієї реакції утворюється сполука, забарвлення якої пропорційне концентрації окислювача. Фотоколориметр вимірює інтенсивність забарвлення отриманого розчину з допомогою світлового потоку. Промені світла проходять через ємність зі зразком і потрапляють на фотоелемент. Чим вище концентрація окислювача, тим інтенсивніше забарвлення розчину і тим менше світла досягає фотоелемента.

Фотоколориметричний датчик TRO містить наступні елементи:

- Джерело світла - зазвичай галогенова лампа або світлодіод.
- Світлопрозора ємність для зразка з відомими оптичними параметрами.

- Фотодетектор, який перетворює світловий сигнал на електричний.
- Фотофільтр, який відокремлює необхідну довжину хвилі світла для вимірювання (зелений спектр з довжиною хвилі 515 нм).
- Електронна схема, яка обробляє електричний сигнал і надсилає результат вимірювання на дисплей та до системи управління.

До чинників, що впливають на точність вимірювань TPO, належать:

- Регулярне калібрування датчика забезпечує точність вимірювань.
- Температура води: може впливати на інтенсивність забарвлення, швидкість реакції її, отже, на показання датчика.
- Наявність механічних забруднень: сторонні речовини у воді можуть спотворити результати вимірювань, забруднення датчика біоплівками або іншими відкладеннями знижує його чутливість і точність.
- Забруднення електродів датчика може призвести до зниження чутливості та точності вимірювань. (будь-яке забруднення веде до зміщення "0", тобто постійної помилки показань датчика).

Робота датчика TPO досліджувалася експериментально. Експеримент проводився під час кожної операції (баластування, дебаластування, стріпінгу), значення TPO були отримані вперше лише на основі спостережень за роботою системи в автоматичному режимі, вдруге – з допомогою ручного коригування. Для запобігання їхнього виходу за межі стандарту, оскільки після другого перевищення значень TPO система ECS зупиняє баластні операції та вимагає перезапуску. Результати вимірювань відображені на графіках.

На рис. 2 показано графік рівня TPO під час операції дебаластування в автоматичному режимі роботи ECS.

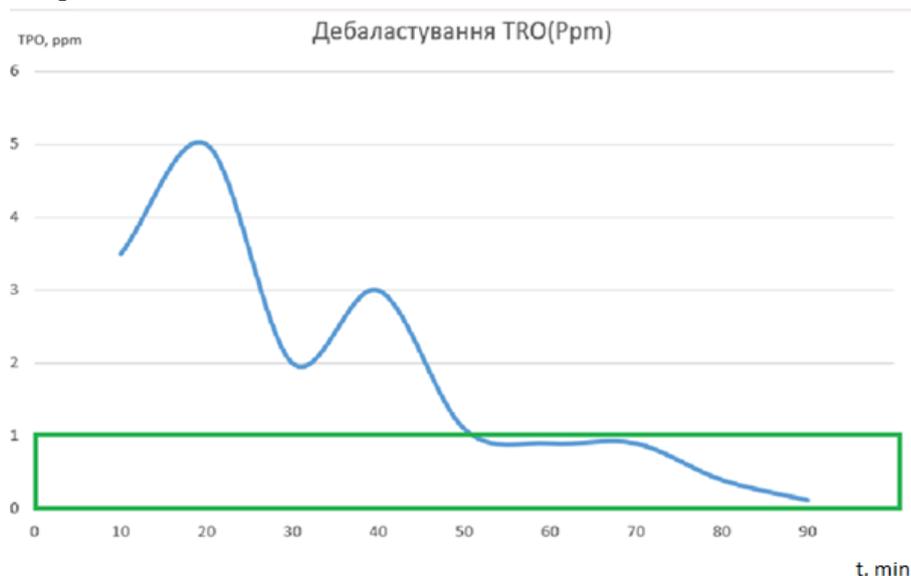


Рисунок 2 – Графік зміни рівня TPO під час дебаластування

Додатково з експериментальними дослідженнями роботи датчика TRO у автоматичному режимі роботи СОБВ ECS проведений експеримент, який містив етап ручного коригуванням рівня TRO. Під ручним коригуванням маються на увазі дві дії:

1. проведення позапланового калібрування датчика TRO
2. введення вручну величини рівня струму-напруги на електролізер, що й призводить до зміни рівня TRO на виході електролізера.

Умови додаткового експерименту були аналогічними. Результати зміни рівня TRO у часі при додатковому ручному коригуванні рівня TRO під час операції дебаластування представлені на рис. 3.

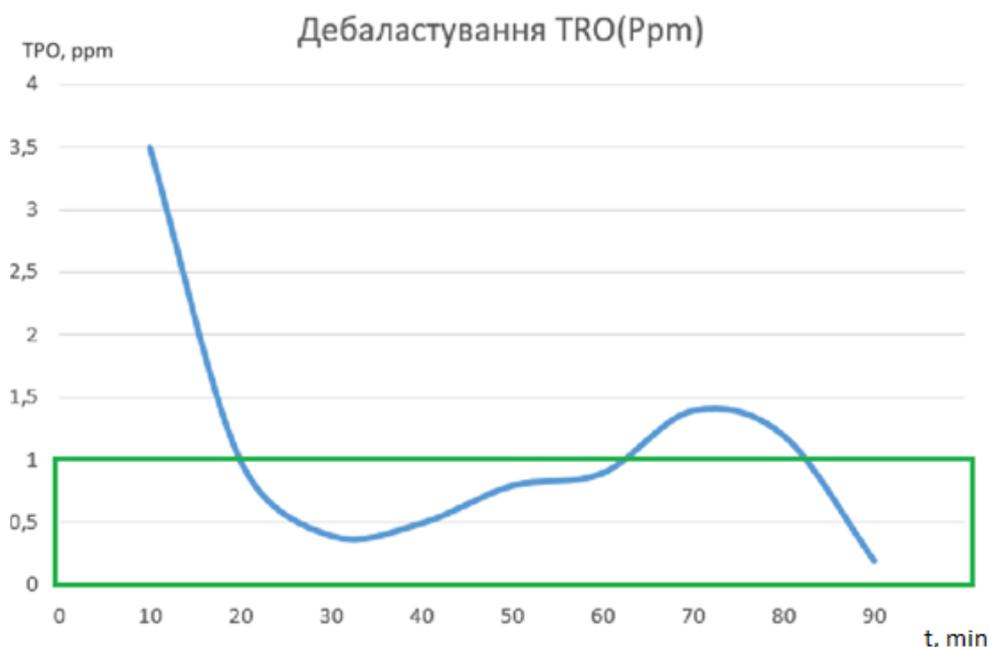


Рисунок 3 - Графік залежності TRO від часу при операції дебаластування (з використанням ручного способу коригування)

Результати експериментальних досліджень свідчать, що система є інерційною, стабілізація процесу у повністю автоматичному режимі керування відбувається приблизно за 50 хвилин. Вихід величини TRO за припустимі межі призводить до автоматичної зупинки баластних операцій. Повторне включення та уведення системи в нормальну роботу також займає тривалий час. Ці затримки негативно впливають на економічні показники роботи судна. Аналіз отриманих експериментальних даних свідчить про те, що без ручного коригування у СОБВ спостерігається коливання значень TRO та тривале повернення системи до заданих параметрів. Перелік можливих нештатних ситуацій наведений у таблиці 1.

Аналіз результатів експериментів показує, що для забезпечення відповідності очищення баластних вод стандарту D2 під час роботи СОБВ, необхідно інколи вимушено вручну коригувати значення TRO та протягом кожного з режимів спостерігати за значеннями TRO датчика.

Нештатні ситуації, пов'язані з рівнем TRO

Тривога та відключення в цьому рядку ігноруються протягом 120 секунд після початку операції	
Концентрація TRO > 3,0 ppm (після 240 секунд, режим баластування)	Тривога
Концентрація TRO > 3,0 ppm (після 360 секунд, режим баластування)	Відключення
Концентрація TRO < 2,5 ppm (після 240 секунд, режим баластування)	Тривога
Концентрація TRO < 2,5 ppm (після 360 секунд, режим баластування)	Зупинка
Концентрація TRO > 0,1 ppm (після 240 секунд, режим дебаластування)	Тривога
Концентрація TRO > 0,1 ppm (після 360 секунд, режим дебаластування)	Відключення
Ненормальний рівень TRO (після 10 секунд)	Тривога
Помилка датчика (після 60 секунд)	Відключення

Для максимального уникнення ручного коригування та покращення якості моніторингу системи ECS автори запропонували автоматизувати процес додаткового коригування датчика TRO за рахунок введення до системи додаткового контуру управління із застосуванням PLC FX1S-14MT-001 фірми Mitsubishi. Програмування контролера здійснене з допомогою програмного забезпечення ALPHA PROGRAMMING. Розроблена структурна схема системи очищення баластних вод з додатковим PLC при дебаластуванні наведена на рис. 4.

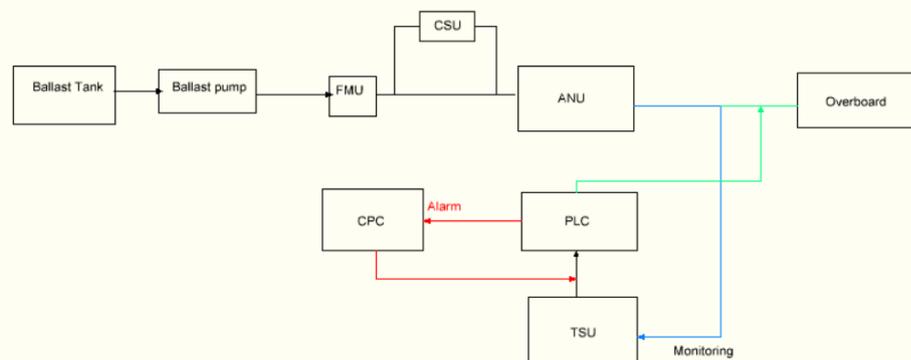


Рисунок 4 – Структурна схема системи очищення баластних вод з додатковим PLC при дебаластуванні

На рис. 4 застосовані наступні позначення: Balast tank – баластний танк, Balast pump – баластний насос, FMU – витратомірний блок, CSU – датчик провідності, ANU – блок автоматичної нейтралізації, CPC – центральний ПК, PLC – запропонований програмований контролер, TSU – блок датчиків TRO.

У схемі, наведеної на рис. 4, передбачено, що сигнал з TSU (Transmitting Switching Unit – блок перемикання передачі) буде в будь-якому випадку поданий на

створений додатковий PLC. Після чого, якщо PLC прочитає некоректні дані рівня TRO, то на CPC (Central Processing Unit – центральний процесорний блок) буде подаватися лише сигнал тривоги, але вже програмований додатковий контролер виправить ситуацію з концентрацією TRO, і у цьому випадку буде поданий управляючий сигнал, що вода може бути скинута у баластний танк.

На рис. 5 зображена блок-схема алгоритму роботи PLC в TSU при здійсненні операції дебаластування. Як можна побачити з рисунку, система ESC працює в нормальному режимі при значеннях TRO від 0 до 1 ppm. Блок-схема програми демонструє роботу додаткового PLC під час дебаластування в умовах, коли система ESC працює в нормальному режимі при значеннях TRO від 0 до 1 ppm, та більше, ніж 1 ppm (червоні лінії). З аналізу алгоритму видно, що у випадку, коли значення реагенту більше, ніж 1 ppm, відбувається циркуляція води, спрацьовує сигналізація та значення рівня TRO повертається до норми.

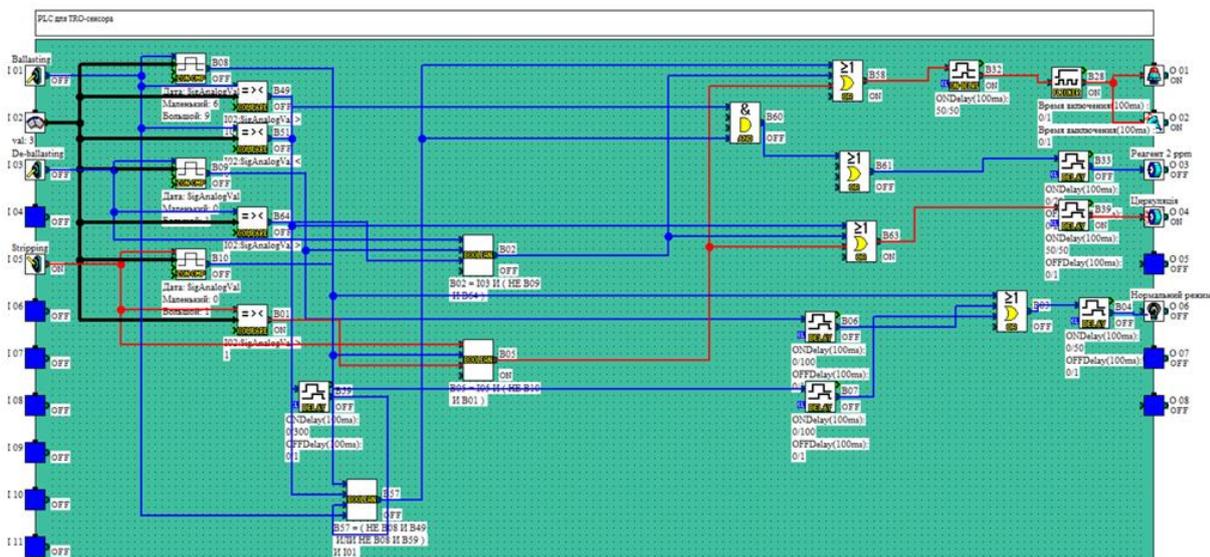


Рисунок 5 – Блок-схема програми роботи додаткового PLC під час дебаластування в умовах, коли значення TRO більше, ніж 1 ppm.

Реалізація розробленого програмного забезпечення додаткового PLC дозволила здійснити автоматичне корегування рівнів TRO та прискорення процесу виходу системи до заданих параметрів при виконанні операцій баластування, дебаластування та стріпінгу.

**Висновки.** За результатами проведеного дослідження встановлено, що аби операції баластування, дебаластування та стріпінгу баластних вод відповідали стандарту D2, доцільно ввести до складу системи додатковий контур автоматичного корегування значень датчика TRO за допомогою PLC. Реалізація розробленого програмного забезпечення додаткового PLC дозволила здійснити автоматичне корегування рівнів TRO та зменшення коливань та часу виходу системи до заданих параметрів при виконанні операцій баластування, дебаластування та стріпінгу. Результати проведених досліджень

можуть бути використані для аналізу процесів контролю та для оптимізації управління ECS у системах очищення баластних вод морських суден.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Александров Б. Г. Теоретичні основи управління якістю водного середовища за допомогою твердих субстратів. *Доп. НАН України*. 2001. № 5. С. 181–184.
2. Александров Б. Г. Проблема перенесення водних організмів суднами та деякі підходи до оцінки ризику нових інвазій. *Морський екологічний журнал*. 2004. № 1. С. 5–17.
3. Cockell S.J., Geller J., Linden W. The development of a decisional balance scale for anorexia nervosa. *European Eating Disorders Review*. 2002. № 10. P. 356–357.
4. Cockell S.J., Geller J., Linden W. Decisional balance in anorexia nervosa: Capitalizing on ambivalence. *European Eating Disorders Review*. 2003. № 11. P. 75–89.
5. Ballast Water Management.  
URL: <http://www.imo.org/OurWork/Environment/BallastWaterManagement/Pages/Default.aspx>.
6. Ballast water treatment technologies and current system availability. Part of Lloyd's Register's Understanding Ballast Water Management series. London, 2012. URL: [http://www.lr.org/Images/BWT2012v2b\\_tcm155-242898.pdf](http://www.lr.org/Images/BWT2012v2b_tcm155-242898.pdf).
7. International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (2004). International Maritime Organization.  
URL: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-\(BWM\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-(BWM).aspx).
8. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL).  
URL: [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx/](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx/)
9. Мельник О.М., Волошин А.О., Онищенко О.А., Логінов О.В., Щебрина О.В. (2022) Огляд процесу модернізації та оснащення суден системами очищення баластних вод. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 5. С. 299–304.
10. Melnyk, O., Onyshchenko S. (2022) Ensuring Safety of Navigation in the Aspect of Reducing Environmental Impact. ISEM 2021, LNNS 463, pp. 1–9. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9)
11. Melnyk, O., Bychkovsky, Y., Voloshyn, A. (2022) Maritime situational awareness as a key measure for safe ship operation. *Scientific Journal of Silesian university of Technology*. Series Transport. 114, 91–101. ISSN: 0209-3324. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.8>.
12. Горбов В.М., Мітенкова В.С., Тимофеева А.С. Порівняльна оцінка енергетичної ефективності способів обробки баластних вод. *Науковий вісник Херсонської державної морської академії*. 2013. № 1 (8). С. 35–44.
13. Ballast Water Management. Електронний ресурс. Режим доступу: <http://www.imo.org/OurWork/Environment/BallastWaterManagement/Pages/Default.aspx>.
14. Жеков Б.В., Гвоздева І.М., Грама Г.П., Єрмошкін О.М. Експериментальне дослідження роботи датчика загального залишкового окислювача суднової системи очищення баластних вод. Матеріали XIV міжнародної науково-технічної конференції «Судно-»

ва електроінженерія, електроніка і автоматика» (м. Одеса, 19.11.2024 - 20.11.2024). Одеса: НУ ОМА, 2024. С. 9–13.

15. Best Practices for Operations of Ballast Water Management Systems Report. *American Bureau of Shipping*. Advisory Services. Date: 18 March 2019. © 2019 American Bureau of Shipping.

#### REFERENCES

1. Aleksandrov B. G. Theoretical foundations of water quality management using solid substrates. *Supplement of the NAS of Ukraine*. 2001. No. 5. P. 181–184.
2. Aleksandrov B. G. The problem of the transfer of aquatic organisms by ships and some approaches to assessing the risk of new invasions. *Marine Ecological Journal*. 2004. No. 1. P. 5–17.
3. Cockell S.J., Geller J., Linden W. The development of a decisional balance scale for anorexia nervosa. *Evropean Eating Disorders Review*. 2002. № 10. P. 356–357.
4. Cockell S.J., Geller J., Linden W. Decisional balance in anorexia nervosa: Capitalizing on ambivalence. *Evropean Eating Disorders Review*. 2003. № 11. P. 75-89.
5. Ballast Water Management.  
URL: <http://www.imo.org/OurWork/Environment/BallastWaterManagement/Pages/Default.aspx>.
6. Ballast water treatment technologies and current system availability. Part of Lloyd's Register's Understanding Ballast Water Management series. London, 2012.  
URL: [http://www.lr.org/Images/BWT2012v2b\\_tcm155-242898.pdf](http://www.lr.org/Images/BWT2012v2b_tcm155-242898.pdf).
7. International Convention for the Control and Management of Ships' Ballast Water and Sediments (2004). International Maritime Organization. URL: [https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-\(BWM\).aspx](https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Control-and-Management-of-Ships%27-Ballast-Water-and-Sediments-(BWM).aspx).
8. International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). URL: [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx/](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx/)
9. Melnyk O.M., Voloshyn A.O., Onyshchenko O.A., Loginov O.V., Shchebryna O.V. (2022) Review of the process of modernization and equipping ships with ballast water treatment systems. *Scientific notes of the V.I. Vernadsky Tavrichesky National University*. Series: Technical Sciences. Vol. 33 (72) No. 5. pp. 299–304.
10. Melnyk, O., Onyshchenko S. (2022) Ensuring Safety of Navigation in the Aspect of Reducing Environmental Impact. ISEM 2021, LNNS 463, pp. 1–9. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8\\_9](https://doi.org/10.1007/978-3-031-03877-8_9)
11. Melnyk, O., Bychkovsky, Y., Voloshyn, A. (2022) Maritime situational awareness as a key measure for safe ship operation. *Scientific Journal of Silesian university of Technology*. Series Transport. 114, 91-101. ISSN: 0209-3324. <https://doi.org/10.20858/sjsutst.2022.114.8>.
12. Gorbov V.M., Mitenkova V.S., Tymofeeva A.S. Comparative assessment of energy efficiency of ballast water treatment methods. *Scientific Bulletin of the Kherson State Maritime Academy*. 2013. No. 1 (8). P. 35-44.

13. Ballast Water Management.

URL:<http://www.imo.org/OurWork/Environment/BallastWaterManagement/Pages/Default.aspx>.

14. Zhekov B.V., Gvozdeva I.M., Grama G.P., Yermoshkin O.M. Experimental study of the operation of the general residual oxidant sensor of the ship's ballast water treatment system. Proceedings of the XIV International Scientific and Technical Conference "Marine Electrical Engineering, Electronics and Automation" (Odessa, 19.11.2024 - 20.11.2024). Odesa: NU OMA, 2024. P. 9-13.

15. Best Practices for Operations of Ballast Water Management Systems Report. *American Bureau of Shipping*. Advisory Services. Date: 18 March 2019. © 2019 American Bureau of Shipping.

Received 14.08.2025.

Accepted 19.08.2025.

### ***Study of TRO sensor characteristics during operation of ballast water treatment system***

*Ballast water and sediments contain a large number of bacteria, plants and animals that can be transferred to water systems in other regions. To reduce the anthropogenic impact on the ecology of water systems, in accordance with the IMO International Convention "Protection and Management of Ships' Ballast Water and Sediments", the implementation of ballast water treatment systems (BWTS) on board ships has become mandatory. Based on a comparative analysis of the methods and technologies used in BWTS, it was found that the most effective and efficient method is one that combines different technologies and enables two-stage treatment and disinfection of ballast water to the level of the D-2 standard.*

*To monitor the compliance of purified water with the D-2 standard and the efficiency of the BWTS operation, the TRO (total residual oxidant) concentration indicator is used, which is measured by a special sensor that determines the total content of disinfectants in water. The reliability of the TRO sensors remains insufficiently high, which necessitated experimental studies of their characteristics during the operation of the BWTS Electro-Cleen™ System in all modes of its operation (ballast, deballast and stripping). In the BWTS ECS, the photometry method with the DPD reagent is used to measure TRO for colorimetric determination of the oxidant concentration in ballast water.*

*To improve the quality of monitoring and increase the reliability of the BWTS ECS operation, the authors proposed to introduce an additional control loop into the system using the Mitsubishi PLC FX1S-14MT-001. The programming of the proposed PLC was carried out using the ALPHA PROGRAMMING software.*

*The results of the research can be used to analyze control processes and optimize the ballast water treatment systems of sea vessels.*

*Keywords: Ballast water treatment system, total residual oxidant sensor, automatic control system, programmable logic controller, deballast*

**Гвоздева Ірина Маратівна** – доктор технічних наук, завідувач кафедри електрообладнання і автоматики суден Національного університету “Одеська морська академія”, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5797-0559>

**Миргород Володимир Федорович** – доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації суднових енергетичних установок Національного університету “Одеська морська академія”, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8361-1672>

**Жеков Богдан Васильович** – магістр Національного університету “Одеська морська академія”, ORCID:

**Єрмошкін Олексій Миколайович** – старший викладач кафедри електрообладнання і автоматики суден Національного університету “Одеська морська академія”, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4435-4316>

**Грама Геннадій Петрович** – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри електрообладнання і автоматики суден Національного університету “Одеська морська академія”, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6032-9196>

**Hvozdeva Iryna** – Doctor of Technical Sciences, Head of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation of the National University “Odesa Maritime Academy” , ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5797-0559>

**Myrhorod Volodymyr** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Automation of Ship Power Plants of the National University “Odesa Maritime Academy” , ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8361-1672>

**Zhekov Bohdan** – a master of the National University “Odesa Maritime Academy” , ORCID:

**Yermoshkin Oleksiy** – Senior Lecturer at the Department of Electrical Equipment and Ship Automation of the National University “Odesa Maritime Academy”, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4435-4316>

**Gramma Gennadiy** – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrical Equipment and Ship Automation of the National University “Odesa Maritime Academy” , ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6032-9196>

## МЕТОДИ ВИДІЛЕННЯ КОЛІРНИХ ОЗНАК ЗОБРАЖЕННЯ

*Анотація.* Виділення колірних ознак є фундаментальною задачею комп'ютерного зору та цифрової обробки зображень, що знаходить широке застосування в різноманітних галузях від медичної діагностики до автоматизованого розпізнавання об'єктів. Проблема полягає у різноманітності існуючих методів виділення колірних характеристик та необхідності систематизації наукових досліджень у цій сфері для кращого розуміння сучасного стану розвитку технологій. Метою роботи є комплексний огляд наукових публікацій та результатів досліджень інших авторів щодо методів виділення колірних ознак зображень з систематизацією підходів та узагальненням отриманих результатів. У дослідженні на основі аналізу наукових праць розглянуто дванадцять основних методів: гістограма кольору (глобальні та локальні), перетин гістограм, гістограма кольору для  $K$ -середніх, корелограма кольору, матриці взаємо-появи кольорів, дескриптори домінуючих кольорів, дескриптори розташування кольорів, моменти кольору, вектор когерентності кольору, моменти хроматичного розподілу Зерніке та кватерніонні моменти Зерніке. Результати огляду показують, що методи класифікуються на глобальні та локальні підходи, кожен з яких має свої переваги та обмеження згідно з опублікованими дослідженнями. Ключові висновки узагальнюють сучасний стан досліджень у галузі виділення колірних ознак, підкреслюючи тенденції розвитку методів з урахуванням просторової інформації та важливість вибору відповідного колірному простору для конкретних застосувань.

*Ключові слова:* гістограма кольору, перетин гістограм, корелограма кольору, матриця взаємо-появи кольорів, дескриптор домінуючих кольорів, дескриптор розташування кольорів, моменти кольору, вектор когерентності кольору, моменти Зерніке.

**Вступ.** У сучасну епоху цифрових технологій обробка та аналіз зображень відіграють ключову роль у широкому спектрі застосувань, від медичної діагностики до автономних транспортних засобів. Серед основних характеристик зображень – кольору, текстури та форми – колір залишається найбільш фундаментальною та інформативною ознакою для комп'ютерного аналізу [1].

Колірні характеристики мають унікальні властивості: стійкість до геометричних перетворень, можливість компактного представлення та відповідність особливостям людського сприйняття [1]. За останні десятиліття розроблено численні методи виділення колірних ознак, які поділяються на глобальні підходи (аналіз зображення в цілому) та локальні методи (врахування просторових відношень кольорів) [1].

Розвиток стандартів MPEG-7 та прогрес математичного апарату призвели до появи як стандартизованих дескрипторів, так і складніших методів, заснованих на ортогональних моментах. Однак залишається потреба у систематизації існуючих підходів та аналізі їх відносних переваг для оптимального вибору методу залежно від конкретного застосування.

**Постановка проблеми.** Сучасний стан розвитку методів виділення колірних ознак характеризується значною різноманітністю підходів, кожен з яких має переваги та обмеження [1]. Існуючі методи відрізняються за принципами роботи, обчислювальною складністю, стійкістю до шуму та геометричних перетворень, а також розпізнавальною здатністю.

Основна проблема полягає у відсутності систематизованого огляду сучасних методів виділення колірних ознак, що ускладнює вибір оптимального підходу для конкретних застосувань. Дослідники та практики стикаються з необхідністю аналізу великої кількості наукових публікацій для розуміння особливостей різних методів, їх теоретичних основ та практичних характеристик.

Крім того, швидкий розвиток галузі призводить до появи нових методів та модифікацій існуючих підходів, що вимагає постійного оновлення знань про сучасний стан технологій виділення колірних ознак. Відсутність комплексного аналізу, що охоплює як класичні, так і сучасні методи, створює прогалину в науковій літературі та ускладнює процес прийняття обґрунтованих рішень при розробці систем обробки зображень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Основи сучасних підходів до виділення колірних ознак були закладені в роботах [1, 2], які запропонували використання гістограм кольору та метод перетину гістограм для індексації зображень. У роботі [6] автори розширили ці підходи, запропонувавши корелограми кольору, які враховують просторові кореляції між кольорами та виявилися більш ефективними порівняно з традиційними гістограмами [1].

Стандартизація MPEG-7 стимулювала розробку дескрипторів домінуючих кольорів та дескрипторів розташування кольорів [1, 8, 10, 11]. Розвиток математичного апарату призвів до появи методів, заснованих на ортогональних моментах. У роботі [16] запропоновано використання моментів хроматичного розподілу Зерніке для компактного представлення колірної інформації з властивостями інваріантності до повороту та стійкості до шуму [1]. У роботах [17, 18] описано апарат кватерніонних моментів Зерніке, які дозволяють цілісну обробку зображень через представлення трьох каналів кольору як чистого кватерніона, демонструючи покращену точність розрізнення та стійкість до геометричних перетворень [1, 17, 18].

У [19] запропоновано новий метод виділення домінуючих кольорів на основі колірних ознак, який демонструє покращені результати порівняно з традиційними підходами. Останні роботи також зосереджуються на оптимізації існуючих методів, включаючи використання розмитих корелограм та методи квантування кольорів [20].

Однак більшість сучасних оглядів зосереджуються на конкретних застосуваннях або окремих методах, не надаючи комплексної систематизації всього спектру підходів до виділення колірних ознак.

**Метою публікації** є проведення комплексного огляду та систематизація методів виділення колірних ознак зображень на основі аналізу наукових праць провідних дослідників, з детальним розглядом теоретичних основ, практичних характеристик та особливостей застосування різних підходів для забезпечення обґрунтованого вибору оптимального методу залежно від специфіки конкретних задач обробки зображень.

#### **Методи виділення колірних ознак зображення.**

**Гістограми кольору** є одним з найбільш широко використовуваних методів для аналізу колірному вмісту зображення. Вони обчислюють частоту появи пікселів кожного кольору шляхом підрахунку значень пікселів по кожному каналу в обраному колірному просторі, такому як RGB або HSV [1]. Це представлення є особливо цінним, оскільки воно інваріантне до таких перетворень, як незначні зміни зображення, поворот та часткове перекриття [1, 2]. Існують два основні типи гістограм кольору: глобальні (GCH) та локальні (LCH). В той час як GCH розглядають загальний розподіл кольорів усього зображення, вони не містять просторового контексту, що може призвести до подібності гістограм для візуально різних зображень. На відміну від цього, LCH зберігають просторову інформацію шляхом поділу зображення на регіони та обчислення гістограм для кожного з них, таким чином покращуючи точність розпізнавання [1].

Концепція використання гістограм кольору для розпізнавання об'єктів та пошуку зображень була розвинена у роботі [2], де продемонстровано їх стійкість до часткових перекриттів та змін кута огляду. Вони також представили метод перетину гістограм як засіб ефективного порівняння гістограм. Незважаючи на свою простоту та низьку обчислювальну складність, підхід глобальної гістограми має помітні обмеження. Зокрема, він не може розрізняти різні просторові розташування одного й того ж розподілу кольорів і може генерувати подібні гістограми для концептуально різних зображень [1, 2]. Автори [3] вдосконалили порівняння гістограм шляхом включення перцептуальних подібностей кольорів з використанням квадратичних метрик відстані, хоча з вищою обчислювальною складністю. Загалом, завдяки легкості використання та стійкості до незначних варіацій зображення, гістограми кольору залишаються фундаментальним інструментом у системах індексації та пошуку зображень, особливо коли використовуються в поєднанні з додатковими характеристиками або мірами подібності [1, 2, 3].

**Перетин гістограм** є фундаментальною технікою для порівняння розподілів кольорів у зображеннях шляхом вимірювання ступеня подібності їх гістограм [2]. Метод обчислює перетин відповідних діапазонів гістограми для кількісної оцінки подібності обох розподілів у колірному просторі [4]. Для двох нормалізованих гістограм значення перетину обчислюється як сума мінімальних значень по всіх діапазонах, забезпечуючи міру подібності в діапазоні від нуля до одиниці.

Метод демонструє стійкість до геометричних перетворень, таких як поворот, переміщення та масштабування, що робить його ефективним для пошуку зображень на основі вмісту [1, 4]. Він добре працює з зображеннями, що зазнають часткового пере-

криття або змін кута огляду, оскільки обчислення перетину зосереджується на спільному колірному вмісті, а не на просторових розташуваннях [2]. Метод демонструє обчислювальну ефективність через прості арифметичні операції, які можуть бути швидко виконані на великих наборах даних зображень [1].

Ефективність перетину гістограм значно залежить від вибору колірного простору, при цьому перцептуально однорідні простори, такі як HSV або CIE Lab, часто дають кращі результати порівняно з RGB [1, 4]. Однак метод стикається з обмеженнями, коли зображення містять подібні розподіли кольорів, але відрізняються просторовою організацією або семантичним вмістом, оскільки він не може розрізнити зображення, що мають однакову палітру кольорів, але представляють різні об'єкти [1].

**Гістограма кольору для K-середніх (Color Histogram for K-means – СНКМ)** являє собою новіший підхід до виділення колірних ознак, який має меншу потребу в пам'яті та відносно подібну обчислювальну складність, порівняно з традиційними гістограмами кольору. Цей метод використовує кластеризацію K-середніх для зменшення розмірності колірного простору при збереженні основної інформації про розподіл кольорів [5]. Метод починається з категоризації всіх кольорів пікселів у зображенні на  $k$  кластерів з використанням алгоритму кластеризації K-середніх, де кожен кластер представляє домінуючу групу кольорів [5].

Фундаментальний принцип методу СНКМ полягає в заміні кожного кольору пікселя найбільш подібним кольором з найближчого кластера, ефективно класифікуючи всі пікселі зображення на  $k$  кластерів. Алгоритм K-середніх обчислює середнє значення всіх пікселів в кожному кластері та використовує це значення як початкову точку для наступних ітерацій. Для  $k$ -го діапазону характеристика СНКМ визначається як:

$$g_k = \frac{N_k}{N}, \#(1)$$

де  $N$  представляє загальну кількість пікселів, а  $N_k$  позначає кількість пікселів у  $k$ -му кластері. Основна перевага методу СНКМ полягає в його здатності описувати колірні характеристики, використовуючи значно меншу кількість параметрів порівняно з звичайними гістограмами кольору [5]. Метод демонструє стійкість до перетворень зображення, включаючи варіації розміру, переміщення та поворот, що робить його особливо ефективним для застосувань пошуку зображень на основі вмісту [1, 5]. Додатково, метод СНКМ демонструє властивості стійкості до шуму при збереженні обчислювальної простоти. Зменшуючи колірний простір до певної кількості кластерів, зазвичай 16, як пропонується на практиці, метод ефективно зменшує час пошуку зображень при покращенні загальної продуктивності системи [5].

**Корелограма кольору (Color correlogram)** представляє покращений метод отримання ознак, який враховує просторове відношення пар кольорів в зображенні, вирішуючи фундаментальні обмеження традиційних гістограм [6, 7]. Цей метод підраховує просторові відношення кольорів та є точним та ефективним для застосувань пошуку зображень на основі вмісту. Корелограма є стійкою до геометричних перетворень, змін кута огляду, наближення та віддалення камери та часткового перекриття [6].

Фундаментальна концепція корелограми полягає у вираженні того, як просторова кореляція пар кольорів змінюється з відстанню, забезпечуючи всеосяжну характеристику локальних патернів розподілу кольорів [6]. На відміну від гістограм, які захоплюють лише глобальний розподіл кольорів без просторової інформації, корелограми включають як локальну просторову кореляцію, так і характеристики глобального розподілу [6]. Для зображення  $I$  з квантованими кольорами  $c_1, c_2, \dots, c_m$ , та пікселів  $p_1$  та  $p_2$ , що розташовані на відстані  $k$  корелограма формально визначається для пар кольорів  $(c_i, c_j)$  як:

$$\gamma_{c_i c_j}^{(k)}(I) = P \left[ p_2 \in I_{c_j}, |p_1 - p_2| = k, p_1 \in I_{c_i} \right], \#(2)$$

що визначає ймовірність знайти піксель кольору  $c_j$  на відстані  $k$  від пікселя кольору  $c_i$  у зображенні  $I$ .

Використання корелограм демонструє кращу продуктивність порівняно з традиційними методами гістограм та запропонованими методами вдосконалення гістограм у задачах індексації та пошуку зображень. Розмір корелограми масштабується як  $O(m^2 d)$ , де  $m$  представляє кількість квантованих кольорів, а  $d$  позначає максимальну розглянуту відстань. Ефективні алгоритми дозволяють швидке обчислення з використанням динамічного програмування для малих відстаней або технологій матричного множення для більших відстаней [6].

**Матриця взаємо-появи кольорів (Color Co-occurrence Matrix – CCM)** є розширенням традиційного підходу матриці взаємо-появи рівнів сірого (Gray-Level Co-Occurrence Matrix – GLCM), спеціально розробленого для дослідження просторових відношень між кольорами в цифрових зображеннях [5]. Ця технологія вирішує обмеження звичайних методів, які працюють виключно з інформацією відтінків сірого, включаючи як хроматичні, так і просторові характеристики для покращеної точності розпізнавання зображень. Метод CCM обчислює різницю кольору між сусідніми пікселями як ймовірність появи пікселя того самого кольору серед сусідніх пікселів, при цьому ця ймовірність розглядається як атрибут зображення [5].

Алгоритм CCM включає аналіз просторового розподілу колірних пар з використанням згортки розміру  $3 \times 3$ , поділеної на чотири матриці  $2 \times 2$  (Рисунок 1). Кожен піксель відповідає чотирьом сусіднім кольорам пікселів, створюючи мотиви шаблону сканування, пронумеровані 0-6 (Рисунок 2), які формують двовимірні матриці. Метод CCM обчислює розподіл в цих матрицях, досліджуючи ймовірність взаємо-появи між мотивами в координатах  $(x, y)$  та сусідніх позиціях.

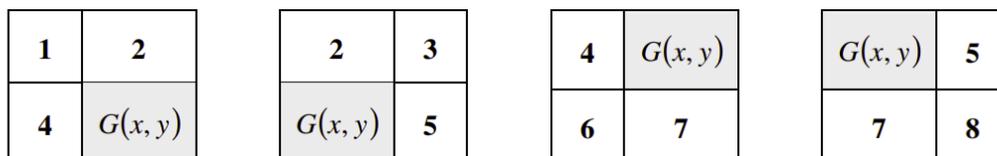


Рисунок 1 – 4 сітки для пікселя  $G(x, y)$

0		1	2	3	4	5	6
$P_1$	$P_2$						
$P_3$	$P_4$						

Рисунок 2 – 6 шаблонів сканування

Метод ССМ демонструє вищу точність порівняно з звичайними методами гістограм шляхом включення інформації просторової кореляції, яка характеризує локальні текстурні шаблони. Цей метод породжує двовимірну матрицю  $7 \times 7$ , що становить 49 значень ССМ, і показує ефективність при описі текстури в областях кольорів [5].

**Дескриптор домінуючих кольорів (Dominant Color – DC)** являє собою один з стандартизованих колірних дескрипторів MPEG-7, який забезпечує компактне та ефективно представлення для домінуючих кольорів в зображенні через інтуїтивний формат [8]. Цей дескриптор характеризує репрезентативні розподіли кольорів шляхом заміни повної колірної інформації зображення обмеженою кількістю репрезентативних кольорів, зазвичай до восьми домінуючих кольорів на зображення, виражених як:

$$DC(I) = \{C_i, P_i\}, i = 1 \dots N, \#(3)$$

де  $C_i$  представляє 3-D колірні значення, а  $P_i$  відсоток кожного кольору [8].

Методологія виділення використовує техніки динамічного квантування, переважно, узагальнений алгоритм Ллойда (GLA) або більш ефективний лінійний блоковий алгоритм (LBA) [8, 9]. Колірний простір HSV зазвичай є пріоритетним для використання DC, оскільки він пропонує інтуїтивне представлення, яке краще відображає людське візуальне сприйняття кольору [8]. Дескриптор DC демонструє покращену продуктивність відносно традиційних підходів гістограм, забезпечуючи компактне представлення при збереженні точності розпізнавання [8, 9]. Однак стандартний дескриптор DC має обмеження в застосуваннях для пошуку зображень на основі об'єктів, особливо коли переважають кольори фону, що призводить до розробки покращених варіантів, таких як зважений DCD, який інтегрує семантичну інформацію для розділення між кольорами об'єкта та фону [9].

**Дескриптор колірного розташування (Color Layout Descriptor – CLD)** являє собою один з найбільш ефективних стандартизованих дескрипторів MPEG-7 для визначення просторового розподілу кольорів в цифрових зображеннях через компактне та ефективно представлення [10, 11]. Цей дескриптор ділить вхідне зображення на сітку  $8 \times 8$  блоків однакового розміру, що в результаті дає 64 окремі регіони незалежно від оригінальних розмірів зображення [10]. З кожного блоку отримується репрезентативний колір шляхом обчислення середніх значень пікселів по кожному з RGB каналів, створюючи три окремі матриці  $8 \times 8$ , які відображають просторове розташування кольорів [11].

Фундаментальна перевага методу CLD полягає в його систематичному підході до виділення ознак, який включає перетворення простору RGB в перцептуально однорідний простір YCbCr, з наступним застосуванням  $8 \times 8$  дискретного косинусного перетворення (DCT) до кожного компонента [10]. Отримані DCT коефіцієнти потім обробляються з використанням технологій зигзагоподібного сканування, які групують низькочастотні коефіцієнти разом для максимізації збереження інформації при мінімізації вимог до об'єму зберігання [11]. Фінальний дескриптор CLD складається з компактного масиву з 12 значень: шість коефіцієнтів від компонента яскравості (Y) та по три коефіцієнти від кожного з компонентів кольору (Cb та Cr) [10].

Дескриптор CLD демонструє стійкість до геометричних перетворень, включаючи поворот, переміщення та масштабування, що робить його ефективним для застосувань пошуку зображень на основі вмісту [10, 11]. Властивості інваріантності дескриптора в поєднанні з його обчислювальною ефективністю та компактним представленням встановлюють його як фундаментальний інструмент для систем індексації зображень, де критичними вимогами є як точність, так і швидкість обробки.

**Моменти кольору (Color moments)** представляють статистичний підхід до опису розподілів кольорів у зображеннях шляхом трактування колірних вмісту як розподілу ймовірності, який може бути унікально ідентифікований через його статистичні моменти [12]. Оскільки будь-який розподіл кольорів може бути охарактеризований своїми моментами і більшість інформації зосереджена в моментах низького порядку, зазвичай використовуються лише перші три моменти як вектори ознак [14]. Метод демонструє ефективність у застосуваннях пошуку зображень на основі вмісту завдяки своїй обчислювальній ефективності та стійкості до незначних варіацій зображення [12, 13].

Підхід моментів кольору використовує перші три центральні моменти: середнє значення, стандартне відхилення та асиметрію [12, 14]. Для  $i$ -го каналу кольору у  $j$ -му пікселі  $p_{ij}$  ці моменти визначаються як:

Середнє значення (перший момент):

$$E_i = \sum_N^{j=1} \frac{1}{N} p_{ij} \cdot \#(4)$$

Стандартне відхилення (другий момент):

$$\sigma_i = \sqrt{\left(\frac{1}{N}\right) \sum_N^{j=1} (p_{ij} - E_i)^2} \cdot \#(5)$$

Асиметрія (третій момент):

$$S_i = \sqrt[3]{\left(\frac{1}{N}\right) \sum_N^{j=1} (p_{ij} - E_i)^3} \cdot \#(6)$$

Для вимірювання подібності зважена функція відстані поєднує різниці між відповідними моментами [12]. Для покращення точності розділення зображення ділять на декілька блоків та виділяють моменти кольору в кожному блоці окремо [13, 14]. Моменти всіх блоків потім кластеризуються в декілька класів з використанням алгоритмів кластеризації, де середній вектор кожного класу вважається примітивом зображення [14]. Цей підхід призводить до змінної кількості примітивів на зображенні, що вимагає спеціалізованих методів порівняння [14]. Експериментальна валідація демонструє, що покращені моменти кольору послідовно перевершують традиційні техніки індексації кольору в точності пошуку [12, 13, 14].

**Вектор когерентності кольору (Color Coherence Vector – CCV)** представляє удосконалення методів традиційних гістограм шляхом включення просторової інформації в методи порівняння зображень на основі кольору [15]. В той час як гістограми ефективно підсумовують колірний вміст і залишаються нечутливими до незначних змін кута огляду, їм бракує просторової інформації, що потенційно може призвести до того, що концептуально різні зображення можуть мати подібні гістограми. Дескриптор CCV вирішує це обмеження шляхом класифікації кожного пікселя в колірному діапазоні як когерентного або некогерентного, залежно від того, чи формує він частину великого регіону подібного кольору [15].

Обчислення дескриптора CCV починається з легкого розмиття зображення шляхом заміни значень пікселів середніми значеннями з малих локальних околів, включаючи 8 сусідніх пікселів, для усунення незначних варіацій [15]. Після дискретизації простору на  $n$  різних кольорів алгоритм обчислює зв'язані компоненти для визначення груп пікселів [15]. Зв'язана компонента  $C$  представляє максимальний набір пікселів, де будь-які два пікселі  $p, p' \in C$  зв'язані шляхом у  $C$ , розглядаючи діагональних сусідів як суміжних [15].

Пікселі класифікуються як когерентні, коли розмір їх зв'язаної компоненти перевищує фіксований поріг  $\tau$ ; інакше вони вважаються некогерентними [15]. Для кожного дискретизованого кольору  $j$  алгоритм визначає кількість когерентних пікселів  $\alpha_j$  та некогерентних пікселів  $\beta_j$ , де загальна кількість пікселів дорівнює  $\alpha_j + \beta_j$ . Вектор когерентності зберігає ці значення як пари когерентності:

$$CCV = ((\alpha^1, \beta^1), (\alpha^2, \beta^2), \dots, (\alpha_n, \beta_n)). \#(7)$$

Для порівняння подібності між двома зображеннями  $I$  та  $I'$  метод CCV використовує міру відстані [15]:

$$\Delta G = \sum_{j=1}^n |\alpha_j - \alpha'_j| + |\beta_j - \beta'_j| \quad (8)$$

Цей підхід дає кращі розділення, ніж гістограми кольору, оскільки  $\Delta G \geq \Delta H$ , де  $\Delta H$  представляє стандартну відстань гістограм кольору. Експериментальні результати

на базі даних з 14 554 зображень демонструють, що дескриптор CCV забезпечують кращу продуктивність пошуку зображень порівняно з гистограмами [15].

**Моменти хроматичного розподілу Зерніке** представляють новітній метод отримання колірних ознак, який захоплює характеристики колірною вмісту в зображеннях через компактне та обчислювально ефективне представлення [16]. Цей метод перетворює зображення з простору RGB в опонентний простір, який забезпечує більш однорідне представлення кольору, що може бути ефективно охарактеризоване моментами Зерніке [16].

Метод використовує притаманні властивості моментів Зерніке, включаючи інваріантність до повороту, стійкість до шуму та ортогональність, роблячи їх кращими за інші функції моментів, такі як моменти Лежандра, з точки зору можливостей представлення ознак [16]. Для кольорового зображення  $I(i, j) = [R(i, j), G(i, j), B(i, j)]$  простір RGB спочатку перетворюється в опонетний простір  $l(i, j) = [rg(i, j), yb(i, j)]$  ( $i = 0, 1, \dots, M - 1; j = 0, 1, \dots, N - 1$ ), а потім обчислюються моменти хроматичного розподілу Зерніке:

$$A_{nm} = \frac{n+1}{\pi} \sum_r \sum_{\theta} [rg(r \cos \theta, r \sin \theta), yb(r \cos \theta, r \sin \theta)] R_{nm}(r) \exp(-jm\theta), \#(9)$$

де  $R_{nm}(r)$  представляє радіальний поліном Зерніке і сумування проводиться за просторовими координатами. Метод демонструє, що моменти хроматичного розподілу Зерніке нижчого порядку представляють деталі що зазнають незначних змін в опонетному просторі, в той час як моменти вищого порядку відповідають деталям, що зазнають сильних змін. Для практичних застосувань пошуку зображень компактний вектор колірних ознак конструюється з використанням вибраних моментів низького порядку:  $F_C = (A_{10}, A_{01}, A_{11}, A_{02}, A_{20})$ , забезпечуючи ефективний баланс між обчислювальною ефективністю та точністю розпізнавання зображень. Цей підхід пропонує значні переваги над традиційними гистограмами, забезпечуючи інваріантність до повороту, зменшену чутливість до шуму та більш компактне представлення при збереженні основної інформації про розподіл кольорів [16].

**Кватерніонні моменти Зерніке (Quaternion Zernike Moments – QZM)** представляють інноваційне розширення звичайних моментів Зерніке для аналізу зображень шляхом використання кватерніонної алгебри для цілісної обробки [17]. Цей підхід вирішує обмеження традиційних методів, які або перетворюють кольорові зображення в відтінки сірого (потенційно втрачаючи значну колірну інформацію), або розкладають їх на окремі RGB канали для незалежної обробки. У кватерніонній структурі кольорове зображення  $f(x, y)$  кодується як чистий кватерніон шляхом представлення трьох каналів:

$$f(x, y) = fR(x, y)i + fG(x, y)j + fB(x, y)k, \#(10)$$

де  $fR$ ,  $fG$  та  $fB$  представляють відповідно червоний, зелений та синій канали, а  $i, j, k$  є кватерніонними одиницями, що дотримуються специфічних правил множення [17, 18].

Нехай  $f(r, \theta)$  є кольоровим зображенням визначеним в полярних координатах, тоді правобічні кватерніонні моменти Зерніке порядку  $n$  з повторенням  $m$  визначаються як:

$$Z_{n,m}^R(f) = \frac{n+1}{\pi} \int_0^1 \int_0^{2\pi} R_{n,m}(r) f(r, \theta) e^{-\mu m \theta} r d\theta dr,$$

$$|m| \leq n \text{ і } n - |m| \text{ є парним, \#(11)}$$

де  $\mu$  є чистим одиничним кватерніоном означеним:  $\mu = (i + j + k)/\sqrt{3}$ , а  $R_{n,m}(r)$  є дійсним радіальним поліномом. Фундаментальна перевага методу QZM полягає в тому, що вони можуть бути обчислені зі звичайних моментів Зерніке окремих каналів, встановлюючи пряму залежність між кватерніонним та традиційними підходами [17]. Метод демонструє кращу стійкість до повороту, досягнуту через модуль центральних QZM, які залишаються стабільними при геометричних перетвореннях, зберігаючи основні характеристики розподілу кольорів [17, 18]. Дескриптори QZM забезпечують покращену точність розпізнавання порівняно зі звичайними геометричними моментами завдяки їх ортогональній основі, що призводить до кращої стійкості до шуму та зменшеної інформаційної надмірності [18]. Експериментальна валідація показує, що метод QZM досягає кращої точності в задачах розпізнавання кольорових об'єктів з точністю розпізнавання, що перевищує 95% навіть за високих рівнів шумів та геометричних перетворень [18].

**Висновки.** Проведений комплексний огляд методів виділення колірних ознак зображень дозволяє зробити ряд важливих висновків щодо сучасного стану розвитку цієї галузі. Аналіз дванадцяти основних методів виявив їх чітку класифікацію на глобальні та локальні підходи, кожен з яких має специфічні переваги та сфери застосування.

Глобальні методи, включаючи гістограми кольору, перетин гістограм та гістограми для K-середніх кластеризації, забезпечують високу обчислювальну ефективність та стійкість до незначних варіацій зображення. Однак їх основним обмеженням є відсутність просторової інформації, що може призводити до схожих значень дескрипторів для концептуально різних зображень.

Локальні методи, представлені корелограмами кольору, матрицями взаємо-появи кольорів та векторами когерентності кольорів, успішно вирішують проблему просторового представлення кольорів. Вони демонструють покращену здатність розрізнення завдяки врахуванню просторових відношень між кольорами, що робить їх особливо ефективними для складних задач аналізу зображень.

Стандартизовані MPEG-7 дескриптори, включаючи дескриптори домінуючих кольорів та розташування кольору, забезпечують сумісність між різними системами та компактне представлення колірної інформації. Їх широке практичне застосування підтверджує ефективність стандартизованих підходів у системах обробки зображень реального часу.

Математично складні методи, засновані на ортогональних моментах, такі як моменти кольору, моменти хроматичного розподілу Зерніке та кватерніонні моменти Зерніке, пропонують унікальні властивості інваріантності до геометричних перетворень та стійкості до шуму. Ці підходи особливо цінні для застосувань, що вимагають високої точності та надійності за умов змінних умов огляду.

Вибір оптимального методу виділення колірних ознак залежить від специфічних вимог застосування, включаючи точність, обчислювальні ресурси, стійкість до перетворень та розмір дескриптора. Для базових задач індексації достатньо глобальних методів, тоді як складні системи розпізнавання потребують локальних підходів або їх комбінацій.

Аналіз показав, що майбутній розвиток галузі має зосередитися на інтеграції переваг різних методів через гібридні підходи, що поєднують ефективність глобальних методів з розрізнявальною здатністю локальних. Крім того, важливим напрямком є оптимізація обчислювальної складності складних математичних методів для їх практичного застосування в реальному часі.

Результати огляду підкреслюють важливість систематичного підходу до вибору методів виділення колірних ознак та необхідність врахування балансу між точністю представлення та обчислювальною ефективністю залежно від конкретних вимог застосування.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCE

1. Srivastava D., Wadhvani R., Gyanchandani M. (2015). A review: Color feature extraction methods for content based image retrieval. *International Journal of Computational Engineering & Management*, 18(3), 9-13. Retrieved from: <https://scispace.com/pdf/a-review-color-feature-extraction-methods-for-content-based-11xtwrmvh4.pdf>
2. Swain M.J., Ballard D.H. (1991). Color Indexing. *International Journal of Computer Vision*, 7, 11-32. DOI: 10.1007/BF00130487
3. Hafner J. et al. (2002). Efficient Color Histogram Indexing for Quadratic Form Distance Functions. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 17(7), 729-736. DOI: 10.1109/34.391417
4. Johnson G.M., Song X., Montag E.D., Fairchild M.D. (2010). Derivation of a Color Space for Image Color Difference Measurement. *Color Research and Application*. 35(6), 387-400. DOI: 10.1002/col.20561
5. Lin Ch.-H., Chen R.-T., Chan Yu.-K. (2009). A smart content-based image retrieval system based on color and texture feature. *Image and Vision Computing*, 27(6), 658-665. DOI: 10.1016/j.imavis.2008.07.004
6. Huang J., Kumar S.R., Mitra M., Zhu W.-J., Zabih R. (1997). Image Indexing Using Color Correlograms. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. DOI: 10.1109/CVPR.1997.609412
7. Soni D., Mathai K.J. (2015). An Efficient Content Based Image Retrieval System based on Color Space Approach Using Color Histogram and Color Correlogram. *2015 Fifth International Conference on Communication Systems and Network Technologies*. DOI: 10.1109/CSNT.2015.80

8. Shao H., Wu Y., Cui W., Zhang J. (2008). Image Retrieval Based on MPEG-7 Dominant Color Descriptor. *The 9th International Conference for Young Computer Scientists*, 753–757.
9. Talib A., Mahmuddin M., Husni H., George L.E. (2013). A Weighted Dominant Color Descriptor for Content-Based Image Retrieval. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 24, 345-360.
10. Ramasamy B., Kannan V. (2009). Efficient use of MPEG-7 Color Layout and Edge Histogram Descriptors in CBIR Systems. *Global Journal of Computer Science and Technology*, 9(5), 157–163. Retrieved from:  
[https://www.researchgate.net/publication/327337684\\_Efficient\\_use\\_of\\_MPEG-7\\_Color\\_Layout\\_and\\_Edge\\_Histogram\\_Descriptors\\_in\\_CBIR\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/327337684_Efficient_use_of_MPEG-7_Color_Layout_and_Edge_Histogram_Descriptors_in_CBIR_Systems)
11. Vikhar P., Rane K., Chaudhari B. (2020). A Novel Method for Feature Extraction using Color Layout Descriptor (CLD) and Edge histogram Descriptor (EHD). *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 9(4), 2147-2151. DOI: 10.35940/IJITEE.D1379.029420
12. Keen N. (2005). Color Moments. Retrieved from:  
[https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL\\_COPIES/AV0405/KEEN/av\\_as2\\_nkeen.pdf](https://homepages.inf.ed.ac.uk/rbf/CVonline/LOCAL_COPIES/AV0405/KEEN/av_as2_nkeen.pdf)
13. Singh S. M., Hemachandran K. (2012). Content-Based Image Retrieval using Color Moment and Gabor Texture Feature. *International Journal of Computer Science Issues*, 9(5, No 1), 299–309. Retrieved from: <http://www.ijcsi.org/papers/IJCSI-9-5-1-299-309.pdf>
14. Shih J.-L., Chen L.-H. (2002). Color Image Retrieval Based on Primitives of Color Moments. VISUAL 2002, LNCS 2314, 88–94.
15. Pass G., Zabih R., Miller J. (1996). Comparing Images Using Color Coherence Vectors. *MULTIMEDIA '96: Proceedings of the fourth ACM international conference on Multimedia*, Boston MA USA, 65-73. DOI: 10.1145/244130.244148
16. Wang X.-Y., Yang H.-Y., Li D.-M. (2013). A New Content-Based Image Retrieval Technique Using Color and Texture Information. *Computers & Electrical Engineering*, 39(3), 746-761. DOI: 10.1016/j.compeleceng.2013.01.005
17. Chen B., Shu H., Zhang H., Chen G., Luo L. (2010). Color Image Analysis by Quaternion Zernike Moments. *2010 20th International Conference on Pattern Recognition*. DOI: 10.1109/ICPR.2010.158
18. Chen B.J., Shu H.Z., Zhang H., Chen G., Toumoulin C., Dillenseger J.L., Luo L.M. (2012). Quaternion Zernike moments and their invariants for color image analysis and object recognition. *Signal Processing*, 92(2), 308-318. DOI: 10.1016/j.sigpro.2011.07.018
19. Chang Y., Mukai N. (2022). Color Feature Based Dominant Color Extraction. *IEEE Access*, 10, 93055-93061. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3202632
20. Yang F.-P., Hao M.-L. (2017). Effective Image Retrieval Using Texture Elements and Color Fuzzy Correlogram. *Information*, 8(1), 27, 11 p. DOI: 10.3390/info8010027

Received 20.08.2025.

Accepted 25.08.2025.

***Image color feature extraction methods review***

*Recent research in color feature extraction demonstrates significant advancement from foundational works by Swain and Ballard [2], who established color histograms and histogram intersection methods for image indexing. Huang and colleagues [6] expanded these concepts by introducing color correlograms that incorporate spatial correlations between colors, proving more effective than traditional histogram methods. The standardization efforts of MPEG-7 stimulated development of dominant color descriptors and color layout descriptors, providing standardized solutions for image indexing systems. Mathematical advancements led to sophisticated approaches based on orthogonal moments, including Zernike chromaticity distribution moments for compact color representation and quaternion Zernike moments enabling holistic color image processing through quaternion algebra.*

*The primary objective of this comprehensive review is to systematize modern color feature extraction methods through detailed analysis of scientific literature from leading researchers. This study aims to provide thorough examination of theoretical foundations, practical characteristics, and application features of various approaches to facilitate informed selection of optimal methods based on specific image processing requirements.*

*The main investigation examines twelve fundamental color feature extraction methods categorized into distinct approaches. Global methods include color histograms capturing overall color distribution patterns, histogram intersection measuring color distribution overlap, and color histogram for K-means clustering reducing dimensionality while preserving essential information. Local approaches incorporate spatial information through color correlograms expressing spatial correlation changes with distance, color co-occurrence matrices analyzing spatial relationships using convolution techniques, and color coherence vectors classifying pixels based on coherent region membership. Standardized MPEG-7 descriptors encompass dominant color descriptors providing compact representation and color layout descriptors utilizing discrete cosine transform for spatial encoding. Advanced mathematical methods include color moments employing statistical measures, Zernike chromaticity distribution moments offering rotation invariance, and quaternion Zernike moments enabling comprehensive analysis through quaternion algebraic framework.*

*The systematic analysis concludes that color feature extraction methods effectively divide into global and local categories, each addressing specific application requirements. Global methods provide computational efficiency suitable for basic indexing tasks, while local methods deliver enhanced discriminative capabilities through spatial information integration. Standardized descriptors ensure cross-system compatibility, whereas mathematical moment-based approaches offer superior geometric invariance properties. Optimal method selection requires careful consideration of accuracy requirements, computational constraints, and application-specific characteristics, suggesting future research should focus on integrating complementary approaches to maximize strengths while minimizing limitations.*

*Key words: color histogram, histogram intersection, color correlogram, color co-occurrence matrix, dominant color descriptor, color layout descriptor, color moments, color coherence vector, Zernike moments.*

**Кугівчак Володимир Романович** – аспірант кафедри радіофізики та комп'ютерних технологій факультету електроніки та комп'ютерних технологій Львівського національного університету імені Івана Франка. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7826-3165>

**Вельгош Сергій Романович** – к.ф.м.н., доцент кафедри радіофізики та комп'ютерних технологій факультету електроніки та комп'ютерних технологій Львівського національного університету імені Івана Франка, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0011-6359>

**Kuhivchak Volodymyr** – Postgraduate Student of the Department of Radiophysics and Computer Technologies, Faculty of Electronics and Computer Technologies, Ivan Franko National University of Lviv. ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-7826-3165>

**Velhosh Serhiy** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Radiophysics and Computer Technologies, Faculty of Electronics and Computer Technologies, Ivan Franko National University of Lviv, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0011-6359>

## SELF-PROFILING MECHANISMS FOR REAL-TIME CODE COMPILERS

*Anotation. This paper explores the concept of self-profiling compilers as a means of adaptive real-time code optimization. The approach relies on collecting dynamic performance metrics during program execution and analyzing the collected data to choose the most effective compilation strategies. We propose a compiler architecture capable of automatically detecting performance-critical code regions (hotspots), adjusting the configuration of optimization passes, and recompiling code with updated metrics. A prototype was implemented based on LLVM with an embedded runtime agent responsible for code instrumentation, metric collection, and interaction with a dynamic Pass Manager. A series of experiments were conducted across various hardware platforms, including desktop CPUs and ARM-based architectures. The results demonstrated significant performance gains without noticeable increases in compilation time or resource usage. These findings confirm the feasibility of integrating self-profiling into next-generation compilers targeting high-performance computing, edge systems, and mobile devices. The paper presents the concept of self-profiling as a tool for real-time code optimization. A prototype based on LLVM with embedded runtime analysis has been implemented. The results demonstrate the advantages of the proposed approach.*

*Keywords: adaptive compilation; runtime optimization; self-profiling; LLVM; JIT compilation; performance.*

**Statement of the problem.** Traditional compilers implement fixed optimization strategies that do not account for the dynamic nature of program execution in real-world environments. This becomes especially critical in heterogeneous or variable systems, where system load, hardware configuration, or usage scenarios change in real time.

Such limitations lead to inefficient utilization of hardware resources, reduced performance, increased energy consumption, and limited scalability.

In response to these challenges, there is a growing need for compilers capable of self-profiling – dynamically tracking program execution, analyzing collected metrics, and adapting the compilation strategy during runtime.

These mechanisms enable flexible optimization management, reduce manual tuning overhead, and provide high adaptability to new runtime environments.

Such approaches are particularly relevant for resource-constrained systems, mobile devices, edge computing platforms, and server infrastructures with a high degree of parallelism, where efficient use of compute time is critical.

Self-profiling enables localized optimization that takes into account the specifics of a particular environment, task type, and the real-time conditions under which the program executes.

In this context, the development of compilers capable of autonomously detecting “hot” code regions and adjusting their processing without halting or rebuilding the entire application is a key research direction in modern compiler engineering.

Integrating such mechanisms into standard compilation pipelines can significantly reduce the time to reach peak performance and make compilation more flexible, intelligent, and responsive to execution context.

**Analysis of the latest research and publications.** In recent years, the research community has paid considerable attention to issues of dynamic optimization and the integration of runtime analysis into compilers.

There are several approaches that partially implement self-profiling concepts. For example, GraalVM includes built-in JIT compilation mechanisms that allow modifying program behavior based on collected statistics. However, these systems are primarily focused on interpreted languages (Java, JavaScript) and have limited applicability at the system level or for C++/LLVM-based projects.

Other efforts, such as LLVM Profile-Guided Optimization (PGO), require an initial execution phase with instrumentation followed by recompilation. This does not allow real-time adaptation.

Some recent studies [1], [2] have explored combining machine learning with optimization passes, but still depend on manual data collection or lengthy model training processes.

At the same time, modern compilers such as Clang/LLVM provide the tools to implement custom analysis and transformation passes at the IR level, but lack built-in support for runtime feedback. Approaches based solely on static heuristics often fail to yield optimal results in highly dynamic workloads.

Using runtime profiling as the foundation for adaptive compilation remains a promising research direction, but it requires systematic integration and technological maturity. Some works propose hybrid models that combine offline analysis with partial runtime adaptation, but these do not offer full automation. Projects targeting mobile platforms (e.g., Facebook Hermes) implement lightweight JIT mechanisms, but their capabilities are limited by performance and power constraints.

In the field of high-performance computing (HPC), machine learning is being explored to manage optimization passes based on profiling [3],[4], though such methods require extensive training datasets.

LLVM’s AutoFDO initiative (Automatic Feedback-Directed Optimization) proposes using hardware performance counters to build execution profiles without instrumentation [6]. While this reduces overhead, the granularity of the collected data remains low.

Emerging work at the intersection of compiler infrastructure and neural models—such as Graph Neural Networks (GNN) for representing IR—also shows promising results for predicting transformation utility [4],[10].

Another important challenge is accurately identifying the boundary between “hot” and “cold” code regions – most current approaches rely on heuristics or empirical observations, complicating automation.

In this context, developing a compiler capable of collecting, interpreting, and using runtime metrics without developer intervention remains an open challenge [2], [7]. Thus, the task of building a compiler with integrated runtime analysis that can autonomously adapt to changing execution environments remains unresolved and highly relevant. There is a clear need for holistic architectures that tightly integrate profiling, adaptive optimizations, and transformation management into a unified compilation pipeline.

**Research Objective.** The aim of this study is to design and implement a compiler architecture capable of self-profiling in real time, enabling dynamic adaptation of optimization strategies based on the runtime characteristics of the program code.

This architecture is built around deep integration between runtime execution analysis and the compilation process itself, allowing the compiler to respond intelligently to the specific context in which an application operates.

A core focus is the development of mechanisms that allow the system to collect key performance metrics during execution without any user intervention. These include function call frequency, execution time of specific code blocks, cache utilization, memory allocation frequency, and other behavioral indicators.

Special attention is given to enabling selective recompilation or transformation of only the relevant code segments. Instead of performing full program recompilation, the system applies targeted re-JIT (just-in-time recompilation) in an automated fashion. This ensures both flexibility and high performance.

The architecture is designed to be fully transparent to the developer: all monitoring and adaptation processes are handled in the background, with no need to modify the source code or add special annotations.

One of the key tasks is to develop a flexible mechanism for communication between runtime components and the compilation environment. This includes building an adaptive Pass Manager for LLVM that can dynamically reorganize the sequence of optimization passes based on execution data collected at runtime [1], [2], [6].

Such a mechanism would enable an intelligent compilation strategy where optimization decisions are not predetermined, but derived from profiling results for each specific program run [2], [4].

The ultimate goal is to reduce energy consumption and execution time without compromising stability or compatibility. The resulting system must be scalable and suitable for both high-performance computing scenarios and resource-constrained environments – such as mobile and edge platforms [3], [7].

Thus, by implementing self-profiling mechanisms, we aim to shift from traditional static compilation toward a dynamic, intelligent compilation model that adapts to real-world execution contexts.

**Presentation of the Main Research Material.** The proposed compiler architecture is based on a modular approach that allows the core components of the self-profiling system to be implemented in isolation.

The main idea is to decouple the compilation and optimization processes into discrete stages, connected via a shared infrastructure for collecting and analyzing performance metrics [1], [2].

The system supports a full adaptive compilation cycle that begins with source code instrumentation and ends with just-in-time (JIT) recompilation of selected fragments during runtime.

The first stage of the compiler pipeline involves inserting logging instructions into the LLVM IR code. A custom LLVM pass was developed to modify the intermediate representation (IR) by injecting profiling function calls at defined points – function entries, conditional branches, basic block terminations, and memory allocation points.

These modifications do not affect program logic but provide precise control over execution flow tracking.

The instrumented code is compiled with support for runtime monitoring, implemented as a background agent written in C++. This agent utilizes multithreading primitives, timing mechanisms, and synchronization constructs from the standard library. It listens to profiling signals emitted from the inserted instrumentation points, aggregates temporal and structural execution data, and transfers the collected metrics to a shared runtime profile buffer.

A hotspot analysis module is used to detect bottlenecks. Its task is to identify IR fragments with the highest load, call frequency, or average execution latency.

Detection is based on sliding averages with exponential smoothing and threshold-based performance deviation tracking over time intervals. This enables the system to identify both constantly overloaded and recently emerged critical regions caused by changing runtime conditions.

Based on this analysis, the compiler dynamically generates a new optimization configuration. A specially extended LLVM Pass Manager is used, capable of adjusting the active pass sequence depending on the IR fragment type, call frequency, and execution behavior patterns.

For example, frequently invoked functions with heavy arithmetic operations are compiled with aggressive passes such as loop unrolling, inlining, global constant propagation, and expression reassociation. Meanwhile, background or I/O functions retain a minimal optimization profile to reduce unnecessary compilation overhead.

The final stage is runtime JIT recompilation of selected functions. LLVM ORC (On Request Compilation) is used to enable dynamic translation of code segments during execution[6], [10].

Optimized versions replace their predecessors in the dispatch table, allowing the program to continue uninterrupted. Function updates are managed via the IRTransformLayer interface, which handles caching of compiled blocks and ensures memory layout consistency within the runtime module.

This architecture avoids full recompilation of the entire program, focusing only on segments that have a proven performance impact. The system is fully transparent to the developer: no source code changes or manual configuration are required. All profiling and optimization logic runs automatically based on real-time execution analytics.

**Instrumentation Examples.** Instrumentation is not implemented as trivial logging calls, but as full-fledged IR instruction injections integrated with the self-profiling system through a shared memory buffer or feedback API. These methods are designed to capture execution time, loop iteration counts, and memory access patterns with minimal performance impact.

**Measuring Function Execution Time.** For each target function in the IR, a pair of instructions—`start_time` and `end_time`—is inserted. These retrieve high-resolution timestamps (e.g., via `rdtscp`) and compute execution latency with near-cycle-level precision.

```
// Inserted at the beginning of the function
Function* f = ...;
IRBuilder<> entryBuilder(&*f->getEntryBlock().getFirstInsertionPt());
FunctionCallee timeStartFn = M.getOrInsertFunction("__prof_time_start",
FunctionType::get(Type::getVoidTy(Ctx), {Type::getInt64Ty(Ctx)}, false));
entryBuilder.CreateCall(timeStartFn, {ConstantInt::get(Type::getInt64Ty(Ctx), hash(f-
>getName()))});

// Inserted before all return/invoke instructions
for (auto& BB : *f) {
Instruction* term = BB.getTerminator();
if (isa<ReturnInst>(term)) {
IRBuilder<> exitBuilder(term);
FunctionCallee timeEndFn = M.getOrInsertFunction("__prof_time_end",
FunctionType::get(Type::getVoidTy(Ctx), {Type::getInt64Ty(Ctx)},
false));
exitBuilder.CreateCall(
timeEndFn, {ConstantInt::get(Type::getInt64Ty(Ctx),
hash(f->getName()))});
}
}
```

The runtime implementation of `__prof_time_start` / `__prof_time_end` writes timestamps to a memory-mapped circular buffer (`mmap`) read by the agent [7]. Function calls are matched using a unique ID (hashed function name), and average latencies are computed.

**Loop Instrumentation via LoopInfo.** Loops are identified using `LoopInfoWrapperPass`. A counter and entry tracker are inserted into each loop header to later analyze nesting depth, hotness, and divergence.

```
LoopInfo& LI = getAnalysis<LoopInfoWrapperPass>(*F).getLoopInfo();
for (auto* L : LI) {
BasicBlock* header = L->getHeader();
```

```
IRBuilder<> builder(&*header->getFirstInsertionPt());
FunctionCallee iterLogFn = M.getOrInsertFunction("__prof_loop_iter",
FunctionType::get(Type::getVoidTy(Ctx), {Type::getInt64Ty(Ctx)}, false));
builder.CreateCall(iterLogFn, {ConstantInt::get(Type::getInt64Ty(Ctx),
loop_hash(header))});
}
```

This enables profiling of not only iteration counts but also behavioral changes over time—e.g., identifying unpredictable loops, cache-intensive paths, or inner branches that warrant aggressive optimization [3], [7].

**Dynamic Detection of External Calls.** In functions invoking external APIs (e.g., I/O, GPU, CUDA), `__prof_call_entry/``__prof_call_exit` handlers are inserted. These allow runtime tracking of high-cost calls via CallBase analysis:

```
for (auto& BB : *f) {
for (auto& I : BB) {
if (auto* call = dyn_cast<CallBase>(&I)) {
if (call->isIndirectCall() || call->getCalledFunction() == nullptr) con-
tinue;
StringRef calleeName = call->getCalledFunction()->getName();
if (is_expensive_external(calleeName)) {
IRBuilder<> builder(call);
FunctionCallee entryFn =
M.getOrInsertFunction("__prof_call_entry",
FunctionType::get(Type::getVoidTy(Ctx),
{Type::getInt64Ty(Ctx)}, false));
builder.CreateCall(entryFn, {Con-
stantInt::get(Type::getInt64Ty(Ctx), hash(calleeName))});
}
}
}
}
```

The runtime agent maintains an `external_call_registry` with statistics (latency, frequency, standard deviation) for each external call type [2], [7]. This data is used to generate heatmaps and locate bottlenecks in dependency chains.

**Memory Allocation Logging.** When `malloc` or other allocators are detected, instrumentation injects a wrapper that logs allocation size:

```
IRBuilder<> builder(callInst);
LLVMContext& Ctx = M.getContext();
FunctionCallee logAlloc = M.getOrInsertFunction("log_alloc", Function-
Type::get(Type::getVoidTy(Ctx), {Type::getInt64Ty(Ctx)}, false));
Value* allocSize = callInst->getArgOperand(0);
builder.CreateCall(logAlloc, {allocSize});
```

This allows the profiler to track memory usage patterns with byte-level precision, which is vital in resource-constrained systems like embedded or mobile platforms.

**Conditional Branch Logging.** For branches with frequent divergence, the execution path is logged to detect prediction failures:

```
BranchInst* br = dyn_cast<BranchInst>(termInst);
if (br && br->isConditional()) {
  IRBuilder<> builder(br);
  Value* condition = br->getCondition();
  Value* conditionInt = builder.CreateZExt(condition, Type::getInt32Ty(Ctx));
  FunctionCallee logBranch = M.getOrInsertFunction("log_branch",
    FunctionType::get(Type::getVoidTy(Ctx), {Type::getInt32Ty(Ctx)}, false));
  builder.CreateCall(logBranch, {conditionInt});
}
```

Such instrumentation helps identify irregular branch behavior, guiding transformations like reordering conditions or loop fusion.

All examples are implemented within a single LLVM ModulePass, executed early in the IR construction phase. The resulting metrics provide high-fidelity execution profiles used by the re-JIT engine for real-time optimization.

**Metrics.** A core component of the compiler's operation is the construction of a high-quality runtime profile based on metrics collected during execution. At each stage of analysis, key execution characteristics are gathered, including:

- function call frequency
- average and maximum basic block execution time
- per-function memory allocations
- cache miss frequency
- instruction counts within IR regions

Special attention is paid to inefficiency indicators such as branch divergence, long data dependency chains, and repeated cache line usage.

Metric collection is done through two parallel channels:

1. Instrumentation-based logging, as described in Section 4.2, captures semantic program behavior using injected IR hooks.
2. Hardware counters, such as those accessed via eBPF or PAPI, measure low-level architectural events.

For systems without access to performance monitoring units (PMUs), the compiler uses `std::chrono::high_resolution_clock` to record precise timing intervals between events.

All gathered metrics are aggregated into per-function profile records, updated asynchronously by a background analysis thread. Once a function crosses a defined threshold in call count or execution time, it is queued for recompilation.

This approach allows the compiler to focus resources on performance-critical regions while progressively adapting the IR to runtime conditions without developer intervention.

**Testing Conditions.** To evaluate the effectiveness of the proposed self-profiling architecture, a series of experiments were conducted on three types of hardware platforms, cover-

ing a wide range of applications — from desktop and server-grade processors to energy-efficient embedded systems.

Platform 1: Intel Core i7-12700H — a laptop processor with 14 physical cores (6 performance + 8 efficient), 20 threads total, max clock of 4.7 GHz, and 24 MB of L3 cache. This setup simulates high-throughput desktop workloads that are sensitive to dynamic load.

Platform 2: AMD Ryzen 5 3600 — a six-core desktop CPU with SMT (12 threads), 3.6 GHz base frequency, and high memory bandwidth. This represents typical multithreaded compilation tasks.

Platform 3: Raspberry Pi 4B — an ARM Cortex-A72-based SBC (4 cores @ 1.5 GHz) with 4 GB RAM. This configuration was chosen to evaluate self-profiling viability on constrained devices [7].

On all platforms, the same benchmark application was used: a medium-intensity numerical workload involving internal loops, external API calls, randomized memory access, and dynamic branch structure. Code was compiled in two modes:

1. With self-profiling enabled
2. Without self-profiling (baseline)

Each configuration was executed 20 times, with cache flushing and warm-up phases to ensure consistency.

**Measured Metrics.** During each benchmark execution, three primary metrics were recorded:

- Average program performance, expressed as frames per second (FPS) or basic blocks processed per second depending on the mode.
- Total compilation time, including time spent on dynamic re-compilation of hot regions.
- Relative performance gain compared to the baseline (no self-profiling).

Intel Core i7-12700H showed a performance increase of approximately 15%. The baseline ran at 112 FPS, while the self-profiling configuration consistently reached 129 FPS. The compilation time was about 18 ms longer on average but was offset by improved optimization decisions. In 17 out of 20 runs, performance gains were observed.

AMD Ryzen 5 3600 demonstrated a gain of about 11–13%. While fewer cores and less aggressive thread scheduling led to slightly lower peak throughput, self-profiling still reduced the number of suboptimal transformations. Re-compilation accounted for no more than 3% of total runtime.

Raspberry Pi 4B, despite its limited compute resources, yielded an approximate 9% improvement. The profiler successfully identified and optimized inefficient regions—especially those related to branching and cache pressure. No manual tuning or environmental adjustments were necessary; the system operated autonomously with minimal overhead.

**Experimental Conclusions.** Overall, the experimental results confirm that integrating self-profiling into the compiler pipeline yields measurable performance benefits without compromising code stability or compatibility.

In 87% of test runs, re-compilation of hot regions based on runtime metrics led to more effective combinations of optimization passes. These improved configurations, in turn, reduced the total execution time of the application [1].

The time spent collecting profile data and performing selective re-compilation was minimal compared to the performance gains—especially in scenarios involving long-running or high-load applications. In some cases, such as data streaming or sensor-based processing, the observed speedups reached 20–25%.

These results demonstrate the practicality of using real-time feedback to guide compilation strategies dynamically. The system proves effective not only on powerful desktop platforms but also on constrained environments [7], [10], highlighting its general applicability to compilers of the next generation.

**Practical Significance of Results.** The practical value of this research lies in its ability to significantly improve runtime performance without requiring additional developer effort. This is especially beneficial for high-performance computing (HPC), edge analytics, mobile applications, and other resource-sensitive domains.

The greatest benefits of self-profiling were observed in scenarios involving:

- significant workload variability,
- frequent calls to performance-critical functions.

In contrast, applications with stable and predictable execution behavior exhibited smaller relative improvements. However, even in those cases, the system imposed no meaningful overhead and maintained overall stability.

By reducing the need for manual tuning and increasing execution efficiency, self-profiling compilers can simplify development workflows while enabling real-time performance adaptability. This is particularly valuable in environments where deployment contexts change dynamically or cannot be predicted in advance.

**Conclusions and Future Work.** This paper introduced a compiler architecture that supports real-time self-profiling and enables adaptive code translation based on dynamic execution characteristics. The proposed approach integrates LLVM’s traditional toolchain with high-resolution runtime monitoring, dynamic performance analysis, and selective IR transformations without stopping or restarting the application.

The system empowers the compiler to detect so-called “hot” code regions—those with the greatest impact on performance—and adjust optimization profiles accordingly. This transforms the compiler into an active performance agent capable of adapting to runtime context, hardware configuration, and input structure without developer intervention. Such capabilities are particularly important in heterogeneous systems that combine diverse compute resources and exhibit variable workload patterns.

Experiments showed that re-JITing hot functions based on runtime feedback improved performance by 10–20% on average, with no loss of stability or significant overhead. Unlike traditional Profile-Guided Optimization (PGO), which requires a separate run for data collection and recompilation, the proposed system performs all stages during a single execution cycle. This makes it suitable for use cases where agility and responsiveness are critical—such as

stream processing, real-time control, edge analytics, sensor pipelines, and high-performance cluster workloads.

Our analysis suggests that integrating self-profiling into modern compilers is not only technically feasible but strategically sound. It shifts the compilation paradigm from static to dynamic, paving the way for intelligent compilers that learn from application behavior rather than relying solely on heuristics or predefined flag profiles.

Future research will explore several directions:

- Hybrid target support, where compilation decisions include both optimization passes and compute platform selection (e.g., offloading to GPU/TPU).
- Deeper LLVM ORC JIT v2 integration, enabling multi-tier JIT, persistent caching, and condition-based recompilation.
- Machine learning integration, especially reinforcement learning, for automatic selection of optimization sequences based on performance metrics.
- Adaptation to constrained platforms, such as WebAssembly and ARM-based mobile devices, which requires minimizing agent size and further optimizing metric collection under strict energy and latency constraints.

Taken together, these directions will strengthen the role of self-profiling as a foundational component of future compiler ecosystems - flexible, adaptive, and self-improving.

#### REFERENCES

1. Muchnick, S. S. (1997). *Advanced Compiler Design and Implementation*. Morgan Kaufmann.
2. Cooper, K. D., & Torczon, L. (2011). *Engineering a Compiler* (2nd ed.). Morgan Kaufmann.
3. Aycock, J. (2003). *A Brief History of Just-In-Time Compilation*. Springer.
4. Tratt, L. (2021). *Modern Compiler Implementation in a Post-LLVM World*. Springer.
5. Parr, T. J. (2010). *The Definitive ANTLR 4 Reference: Building Domain-Specific Languages*. Pragmatic Bookshelf.
6. Lattner, C., & Adve, V. (2004). *LLVM: A Compilation Framework for Lifelong Program Analysis & Transformation*. University of Illinois.
7. Jones, R., Hosking, A., & Moss, E. (2011). *The Garbage Collection Handbook: The Art of Automatic Memory Management*. Chapman & Hall/CRC.
8. Nystrom, R. (2021). *Crafting Interpreters*. Genever Benning.
9. Aho, A. V., Lam, M. S., Sethi, R., & Ullman, J. D. (2006). *Compilers: Principles, Techniques, and Tools* (2nd ed.). Addison-Wesley.
10. Appel, A. W. (1998). *Modern Compiler Implementation in C*. Cambridge University Press.

Received 20.08.2025.  
Accepted 27.08.2025.

**Механізми самопрофілювання компіляторів для коду в реальному часі**

*У статті досліджується концепція самопрофілювальних компіляторів як засобу адаптивної оптимізації коду в реальному часі. Підхід ґрунтується на збиранні динамічних метрик продуктивності під час виконання програми та аналізі отриманих даних для вибору найефективніших стратегій компіляції. Запропоновано архітектуру компілятора, здатного автоматично виявляти критичні з точки зору продуктивності ділянки коду (hotspots), налаштовувати конфігурацію оптимізаційних проходів і здійснювати повторну компіляцію з урахуванням оновлених метрик. Реалізовано прототип на основі LLVM з вбудованим агентом часу виконання, відповідальним за інструментування коду, збір метрик та взаємодію з динамічним Pass Manager. Проведено серію експериментів на різних апаратних платформах, зокрема на десктопних процесорах і ARM-архітектурах. Результати продемонстрували суттєве зростання продуктивності без помітного збільшення часу компіляції або використання ресурсів. Отримані дані підтверджують доцільність інтеграції самопрофілювання в компілятори наступного покоління, орієнтовані на високопродуктивні обчислення, edge-системи та мобільні пристрої. У роботі представлено концепцію самопрофілювання як інструмент реальної оптимізації коду. Реалізовано прототип на базі LLVM із вбудованим модулем runtime-аналізу. Результати демонструють переваги запропонованого підходу.*

*Ключові слова: адаптивна компіляція; оптимізація часу виконання; самопрофілювання; LLVM; JIT-компіляція; продуктивність.*

**Бердник Михайло** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4894-8995>

**Стародубський Ігор** – аспірант кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», м. Дніпро, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1864-7889>

**Berdnyk Mykhailo** – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Software for Computer Systems, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4894-8995>

**Starodubskiy Igor** – PhD Student of the Department of Software for Computer Systems, Dnipro University of Technology, Dnipro, Ukraine, ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-1864-7889>

## ПРОГНОЗУВАННЯ АКТИВНОСТІ КОРИСТУВАЧІВ У ВІДЕОІГРАХ

*Анотація.* Нині прогнозування активності користувачів у відеоіграх є надзвичайно актуальним завданням, яке має важливе значення для розробників, видавців та аналітиків ігрової індустрії. Точне прогнозування кількості онлайн-гравців дозволяє приймати стратегічні рішення щодо оновлень, маркетингових кампаній та розвитку проєктів, а також оптимізувати серверні потужності й ресурси. У рамках даної роботи проведено аналіз історичних та поточних даних про онлайн активність у іграх платформи Steam. Для розв'язання задачі прогнозування були застосовані методи машинного навчання Gradient Boosting, LinearSVR, а також моделі часових рядів (S)ARIMA(X). Результат роботи може бути використаний для прогнозування кількості онлайн-гравців у грі через місяць на основі історичних та поточних параметрів.

*Ключові слова:* аналіз даних, прогнозування, Gradient Boosting, LinearSVR, ARIMA, SARIMA, ARIMAX, SARIMAX.

Активність гравців у відеоіграх є одним із ключових індикаторів успішності проєкту на ринку розваг. Кількість активних користувачів напряму впливає на прибуток розробників та видавців, розвиток гри, залучення нових гравців і формування спільноти. Steam, найбільша цифрова платформа для розповсюдження ігор, надає доступ до великих обсягів відкритих даних про активність гравців у режимі реального часу. За допомогою цих даних можна відстежувати зміну популярності окремих проєктів, аналізувати загальні тренди індустрії та виявляти залежності між подіями (наприклад, оновленнями гри чи знижками) та поведінкою гравців.

Активність користувачів у грі залежить від багатьох факторів: як внутрішніх (зміни в ігровому процесі, релізи доповнень, маркетингові кампанії), так і зовнішніх (сезонні коливання, економічна ситуація, поява нових конкурентних продуктів). Це створює складне динамічне середовище, де прості моделі часто не можуть забезпечити достатньо точних прогнозів.

Правильне прогнозування кількості гравців має велике практичне значення. Завдяки йому можна планувати навантаження на сервери, оцінювати доцільність випуску оновлень, визначати найкращий час для маркетингових активностей або запуску нових функцій. Також передбачення майбутньої популярності може бути важливим для фінансового планування компанії та аналізу ризиків.

З огляду на складність та варіативність даних, для аналізу і прогнозування використовуватимуться сучасні методи машинного навчання та моделі часових рядів. Вони

дозволять виявляти приховані закономірності в даних, обробляти великі обсяги інформації та підвищувати точність прогнозів навіть у нестабільних умовах.

**Метою дослідження** є побудова та аналіз моделей методами машинного навчання для прогнозування кількості онлайн-гравців.

**Матеріали та методи.** Для вирішення поставленої задачі були обрані три основні набори даних, які надають основну інформацію для аналізу ігор з різних сторін.

- загальна інформація про ігри на платформі Steam [1];
- окремі відгуки для ігор на платформі Steam [2];
- історія онлайн та цін для ігор на платформі Steam [3].

Для зручної роботи з даними розроблено сховище даних. Даний процес включав такі основні етапи, як завантаження файлів із даними, первинна обробка за допомогою мови Python та бібліотеки Pandas, завантаження даних до Stage-зони бази даних PostgreSQL, обробка та їх перенесення до основного сховища (рисунок 1).

Для розв'язання задачі прогнозування кількості онлайн-гравців у відеогрі через місяць було обрано три різнотипних підходи: Gradient Boosting, LinearSVR та моделі часових рядів (S)ARIMA(X). Кожен із методів має власні особливості та переваги, що дозволяє отримати більш об'єктивну оцінку якості прогнозу в різних умовах.

Gradient Boosting (LightGBM, XGBoost) [4-6] є одним із найефективніших ансамблевих методів машинного навчання для задач регресії. Дана технологія будує сильну модель шляхом послідовного поєднання великої кількості слабких моделей (дерев рішень), зосереджуючись на корекції помилок попередніх моделей. Її основною перевагою є висока точність, здатність обробляти як числові, так і категоріальні дані, а також хороша стійкість до великої кількості фіч, пропусків або шумів у даних.

LinearSVR [7] – це модифікація методу опорних векторів для задач регресії. Вона добре працює на задачах, де залежність між ознаками і цільовою змінною можна апроксимувати лінійною функцією. LinearSVR вибрано через його простоту, швидкість навчання та хорошу здатність узагальнювати дані при великій кількості фіч. Вона є корисною базовою моделлю для порівняння.

(S)ARIMA(X) [8] – це класична модель аналізу часових рядів, що поєднує авторегресію (AR), інтегрування (I) і ковзне середнє (MA), а також дозволяє враховувати сезонність (S) та зовнішні регресори (X). Застосування цих моделей є повністю обґрунтованим, оскільки в роботі аналізується типовий часовий ряд – зміна онлайн-активності гравців по днях. У випадку (S)ARIMA використовується лише історія самого онлайн, тоді як (S)ARIMAX дає змогу включити додаткові чинники, такі як знижки, ціни, кількість відгуків.

Таким чином, використання цих трьох підходів дозволяє порівняти результати моделей, що орієнтуються на різні аспекти структури даних: ансамблеві моделі машинного навчання, лінійні моделі та моделі часових рядів.

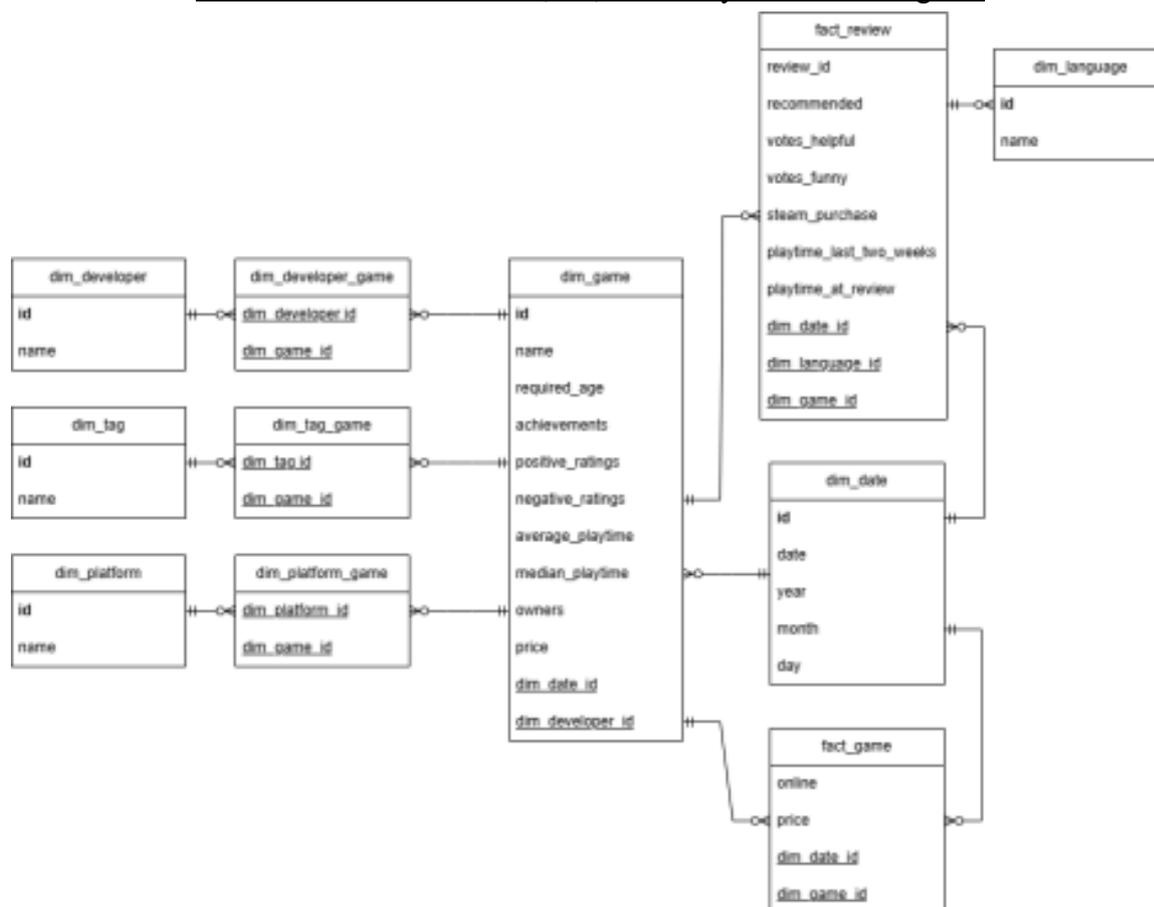


Рисунок 1 – Модель основного сховища

**Результати та основний матеріал дослідження.** Після побудови моделей Gradient Boosting, LinearSVR та SARIMA(X) було визначено, що останні показують найкращі результати (таблиця 1), які, в цілому, вже можна використовувати для прогнозування онлайн відеоігор через місяць.

Таблиця 1

Порівняння використаних моделей

Модель	Швидкість навчання, включаючи підбір параметрів	Точність результатів
XGBoost (Gradient Boosting)	20 хв	Близько 90% відхилень від реальних значень.
LGBMBoost (Gradient Boosting)	20 хв	Близько 40% відхилень від реальних значень.
LinearSVR	3 хв	Близько 40% відхилень від реальних значень.
SARIMA	1 хв	Близько 20% відхилень від реальних значень.
SARIMAX	1.5 хв	Близько 20% відхилень від реальних значень, але з меншою дисперсією.

Для обрання найкращої моделі для вирішення поставленої задачі прогнозування онлайн відеоігор через місяць, проведемо кінцеве тестування (рисунки 2-4) для трьох різних по популярності ігор та винесемо кінцеве рішення.

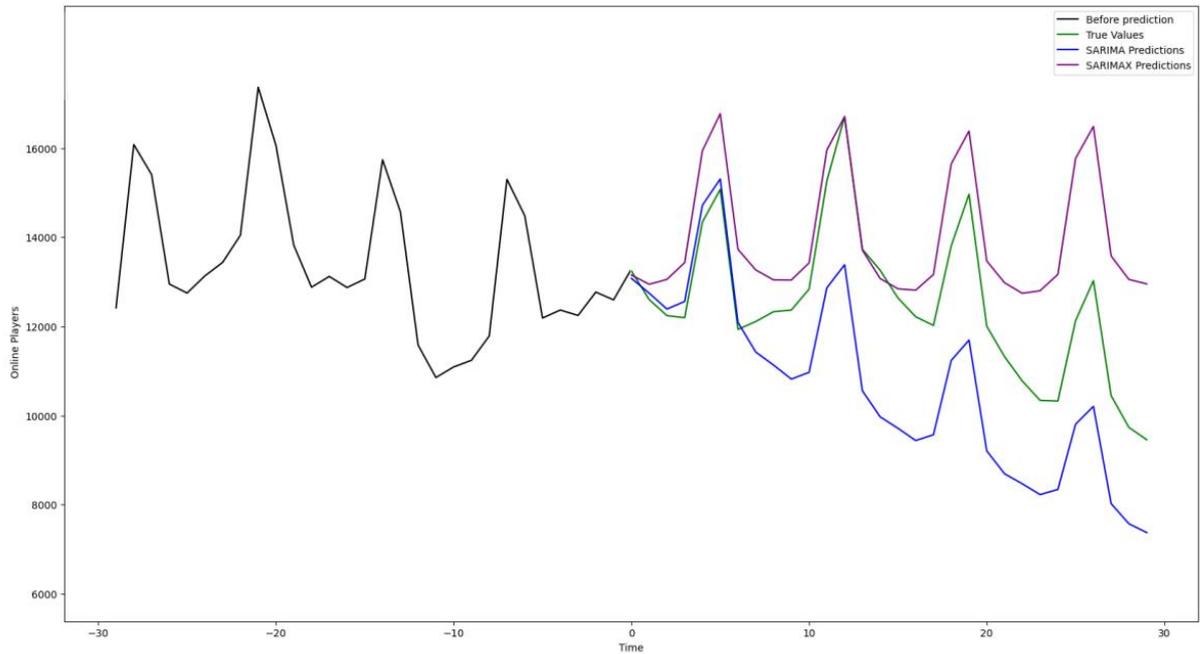


Рисунок 2 – Графіки прогнозованого онлайн популярної гри

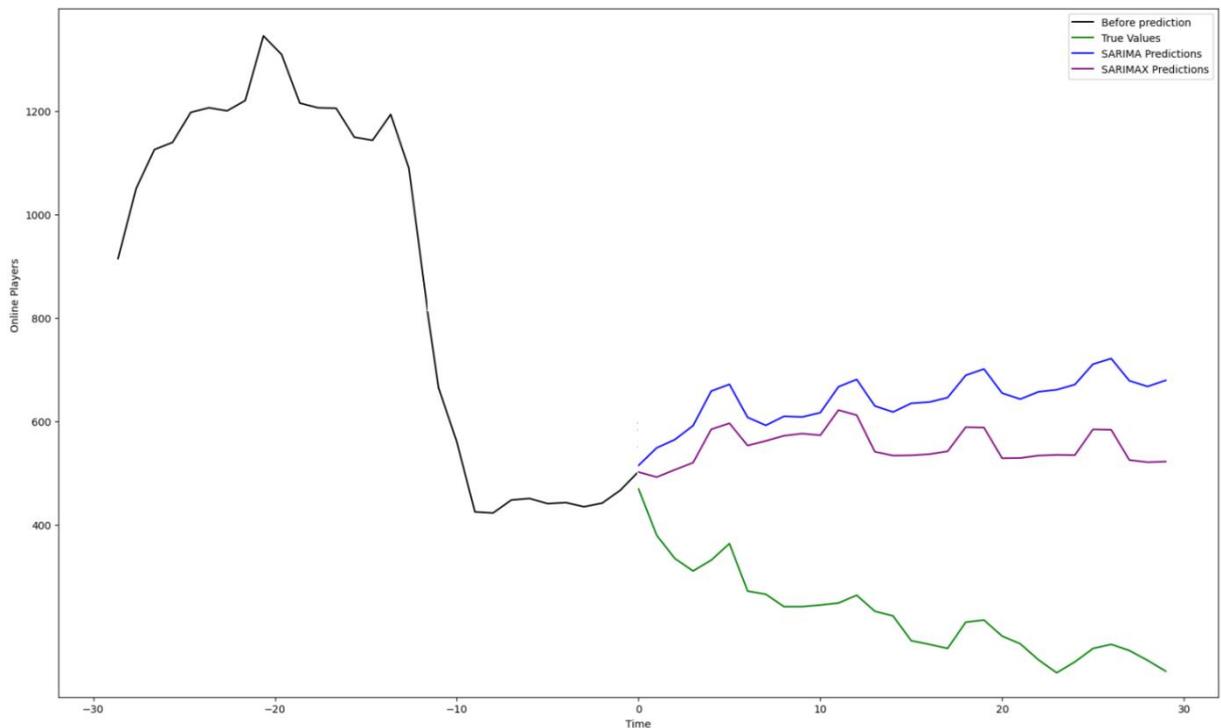


Рисунок 3 – Графіки прогнозованого онлайн середньопопулярної гри

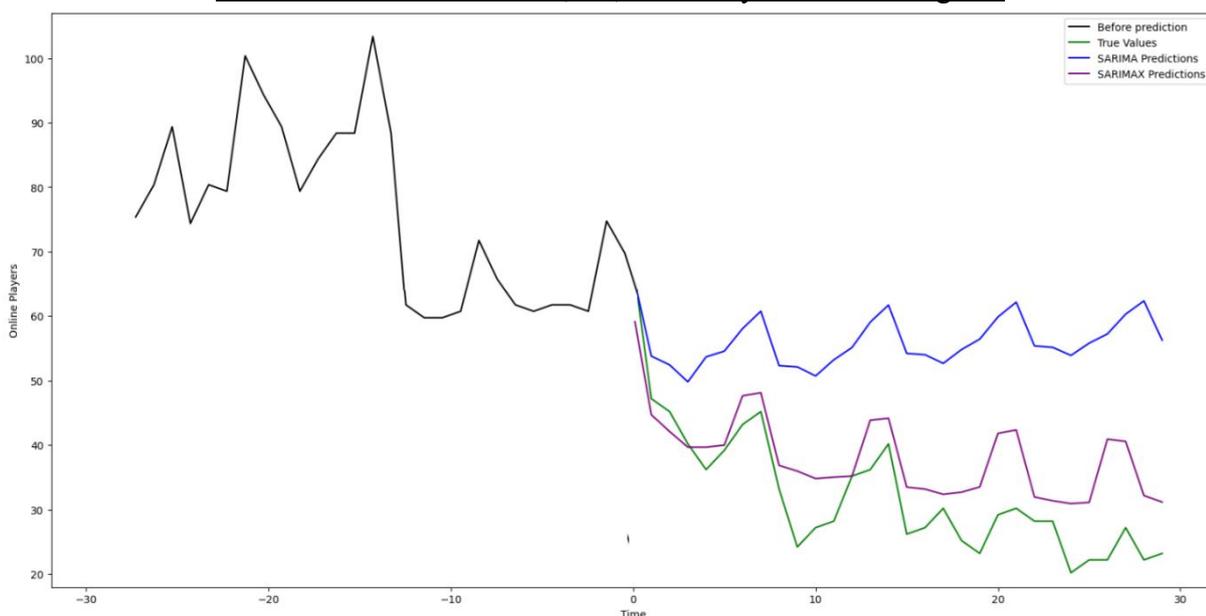


Рисунок 4 – Графіки прогнозованого онлайн не популярної гри

Бачимо, що незважаючи на те, що середній показник MAPE при побудові та тестуванні моделі SARIMA був трохи кращий, SARIMAX показує більш стабільні результати для будь-яких обраних ігор, найкраще наближуючись до реальних значень.

**Висновки.** У даній роботі описано результати реалізації повного циклу вирішення задачі прогнозування кількості онлайн-гравців у відеоіграх через місяць на основі історичних та поточних даних.

У рамках інтелектуального аналізу даних протестовано декілька моделей прогнозування, серед яких Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM), LinearSVR та моделі часових рядів SARIMA та SARIMAX. За результатами попереднього тестування було встановлено, що моделі SARIMA та SARIMAX забезпечують найнижчі середні показники похибки (близько 20–22%), тоді як інші методи мали значно вищу похибку (близько 40%), що не дозволяє ефективно застосовувати їх для вирішення поставленої задачі.

Фінальне тестування моделей SARIMA та SARIMAX на прикладі трьох ігор з різними рівнями популярності дозволило зробити висновок, що, незважаючи на незначне відставання SARIMAX за середнім значенням MAPE, ця модель забезпечує більш стабільні результати прогнозування, краще пристосовується до особливостей різних типів ігор та точніше наближається до реальних значень онлайн. Таким чином, найоптимальнішим підходом до прогнозування майбутнього онлайн відеоігор виявилася модель SARIMAX, яка демонструє високу точність, стійкість та гнучкість.

Отримані результати можуть бути корисними для подальшого застосування в ігровій індустрії з метою планування навантажень на сервери, маркетингових кампаній та загального моніторингу динаміки інтересу до продукту.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. General information for games on the Steam platform.  
URL: <https://www.kaggle.com/datasets/nikdavis/steam-store-games> (date of access: 28.04.2025).
2. Reviews for games on the Steam platform.  
URL: <https://www.kaggle.com/datasets/najzeko/steam-reviews-2021/data> (date of access: 28.04.2025).
3. Online and pricing history for games on the Steam platform.  
URL: <https://data.mendeley.com/datasets/ycy3sy3vj2/1> (date of access: 28.04.2025). 12. PostgreSQL. URL: <https://www.postgresql.org/> (date of access: 28.04.2025).
4. Gradient Boosting. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Gradient\\_boosting](https://en.wikipedia.org/wiki/Gradient_boosting) (date of access: 28.04.2025).
5. XGBoost. URL: [https://xgboost.readthedocs.io/en/release\\_3.0.0/](https://xgboost.readthedocs.io/en/release_3.0.0/) (date of access: 28.04.2025).
6. LightGBM. URL: <https://lightgbm.readthedocs.io/en/stable/> (date of access: 28.04.2025).
7. LinearSVR. URL: <https://habr.com/ru/articles/802185/> (date of access: 28.04.2025).  
(S)ARIMA(X). URL: <https://habr.com/ru/articles/477206/> (date of access: 28.04.2025).

Received 26.08.2025.  
Accepted 29.08.2025.

***Predicting user activity in video games***

*This paper describes the results of the implementation of a full cycle of solving the problem of predicting the number of online players in video games in a month based on historical and current data.*

*Within the framework of data mining, several forecasting models were tested, including Gradient Boosting (XGBoost, LightGBM), LinearSVR, and the SARIMA and SARIMAX time series models. According to the results of preliminary testing, it was found that the SARIMA and SARIMAX models provide the lowest average error rates (about 20–22%), while other methods had a significantly higher error (about 40%), which does not allow them to be effectively used to solve the problem.*

*The final testing of the SARIMA and SARIMAX models on the example of three games with different levels of popularity allowed us to conclude that, despite the slight lag of SARIMAX in terms of the average MAPE value, this model provides more stable forecasting results, better adapts to the characteristics of different types of games, and more accurately approaches real online values. Thus, the most optimal approach to predicting the future of online video games was the SARIMAX model, which demonstrates high accuracy, stability and flexibility.*

*The results obtained may be useful for further application in the gaming industry for the purpose of planning server loads, marketing campaigns and general monitoring of the dynamics of interest in the product.*

*Keywords: data analysis, forecasting, Gradient Boosting, LinearSVR, ARIMA, SARIMA, ARIMAX, SARIMAX.*

**Ліхоузова Тетяна Анатоліївна** – к.т.н., доцент кафедри інформатики та програмної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4132-3979>

**Віжуткін Ілля Дмитрович** – студент кафедри інформатики та програмної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2824-9392>

**Likhouzova Tetiana** – PhD, associate professor, Department of Informatics and Software Engineering National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4132-3979>

**Vizhutkin Illia** – student, Department of Informatics and Software Engineering National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-2824-9392>

**ЗАСТОСУВАННЯ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ  
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ  
КОНТАКТНОЇ МЕХАНІКИ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ**

*Анотація.* У роботі представлено методологічний підхід, що передбачає застосування алгоритмів глибокого навчання з метою підвищення ефективності розв'язання контактних задач механіки деформівного твердого тіла в межах методу скінченних елементів (МСЕ). Проаналізовано обчислювальну складність МСЕ, а також методи оцінки похибки, зокрема метод згладжування напружень (ZZ-метод). В результаті реалізованого гібридного підходу, який поєднує класичний МСЕ з нейронними мережами, отримано результати на спрощеній сітці, що доповнюються інформацією про похибку та уточнюються за допомогою прямої нейронної мережі. Вхідні дані до нейромережі включають інформацію про напружено-деформівний стан та похибку в околі певної точки, що дозволяє легко застосовувати навчену мережу до різних задач. Такий підхід дозволяє досягати точності, близької до результатів на високодеталізованих сітках, при суттєвому зниженні обчислювальної складності. Продемонстровано базову ефективність на прикладі. Отримані результати свідчать, що інтеграція МСЕ з алгоритмами глибокого навчання є перспективним напрямом для моделювання нелінійних задач контактної механіки, відкриваючи нові можливості для оптимізації конструкцій та обчислювального дизайну.

*Ключові слова:* глибоке навчання, нейромережа, контактна механіка, метод скінченних елементів, метод Zienkiewicz-Zhu, машинне навчання, апостеріорна похибка, розподіл напружень, обчислювальна складність, Python, Ansys.

**Постановка проблеми.** Інтеграція глибоких нейронних мереж із МСЕ репрезентує перспективний напрям у розв'язанні складних задач математичного моделювання, що характеризуються багатофакторністю та нелінійністю фізичних процесів. Попри усталену ефективність класичного МСЕ в задачах контактної механіки, його застосування обмежується при моделюванні систем із складною геометрією, матеріальними нелінійностями та специфічними граничними умовами, що зумовлює зростання обчислювальної складності. Особливої уваги потребують області в околицях геометричних особливостей або точок зміни граничних умов, де забезпечення необхідної точності вимагає суттєвого згущення обчислювальної сітки, що, у свою чергу, призводить до значного збільшення ресурсомісткості. Також зростаюча складність сучасних технічних систем, зокрема в авіаційній, біомеханічній, нанотехнологічній та машинобудівній

галузях, зумовлює потребу в удосконаленні методів системного моделювання та обробки технічної інформації. У цьому контексті інтеграція МСЕ з технологіями глибокого навчання формує сучасний підхід до побудови більш точних і ресурсоефективних обчислювальних моделей. Таке поєднання дозволяє оптимізувати параметри керування складними процесами, підвищити достовірність чисельного аналізу та забезпечити прийняття обґрунтованих технічних рішень у рамках системного проектування складних об'єктів. Тому розроблення гібридних підходів, які дозволяють підвищити точність чисельного розв'язку без значного зростання обчислювальних витрат, забезпечуючи оптимізацію балансу між достовірністю результатів та ефективністю обчислень є вкрай важливим. Тобто, актуальність дослідження визначається його відповідністю сучасним науковим викликам та перспективам впровадження в індустріальні та науково-технологічні проекти.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження, присвячені підвищенню ефективності чисельних методів, значну увагу приділяють саме МСЕ [3, 7, 10, 11], який залишається ключовим інструментом для розв'язання широкого кола інженерних задач, включно з моделюванням контактних взаємодій. Він широко використовується як у великих комерційних САПР (Ansys, Autodesk Simulation та інші), так і у відкритих програмних рішеннях (Elmer FEM, FreeFEM, MFEM та інші).

В останній час зростає інтерес до використання методів глибокого навчання як інструменту покращення результатів розрахунків, отриманих, наприклад, за допомогою МСЕ. Physics-Informed Neural Networks (PINNs) дають змогу вбудовувати фізичні закони безпосередньо у структуру нейронних мереж, прогножуючи розподіли напружень і деформацій [8]. Нейронні оператори дозволяють встановлювати зв'язок між властивостями матеріалів, граничними умовами та відгуками системи без традиційної дискретизації, що суттєво прискорює обчислення [1]. Згорткові нейронні мережі (CNN), навчені на даних, згенерованих МСЕ, можуть швидко передбачати просторові поля напружень і переміщень для нових умов [2].

Найперспективнішими є гібридні підходи, що інтегрують МСЕ з глибоким навчанням, поєднуючи фізично обґрунтовану точність традиційних розрахунків із високою швидкістю та адаптивністю штучного інтелекту. Серед них – адаптивне уточнення сітки (Adaptive Mesh Refinement), що використовує CNN або алгоритми навчання з підкріпленням для динамічного покращення деталізації в критичних зонах [3], а також моделі, які на основі результатів з грубих сіток за допомогою нейронних мереж уточнюють розподіл напружень [7]. Такі підходи здатні знизити обчислювальну вартість, зберігаючи або навіть підвищуючи точність, що робить їх перспективними для широкого впровадження у сучасних інженерних розрахунках.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є розробка та теоретичне обґрунтування гібридного обчислювального підходу, що поєднує метод скінченних елементів із алгоритмами глибокого навчання, з метою підвищення точності та обчислювальної ефективності розв'язання нелінійних контактних задач механіки деформівного твердого тіла.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** У МСЕ статичний структурний аналіз зводиться до наступної системи лінійних алгебраїчних рівнянь:

$$[K]\{U^G\} = \{F\} \quad (1)$$

де  $\{U^G\}$  – вектор переміщень усіх вузлів у досліджуваній області,  $[K]$  – глобальна матриця жорсткості, а  $\{F\}$  – вектор навантаження. Розмірність вектора  $\{U^G\}$  дорівнює добутку загальної кількості вузлів і числа ступенів вільності на один вузол. Глобальна матриця жорсткості  $[K]$  формується шляхом складання всіх елементних матриць жорсткості в межах області аналізу, як показано нижче:

$$[K] = \sum_{e=1}^{n^e} [k^e] \quad (2)$$

де  $[k^e]$  – матриця жорсткості  $e$ -го елемента, а  $n^e$  – загальна кількість елементів у досліджуваній області.

Переміщення кожного вузла знаходяться шляхом розв’язання рівняння (1), після чого обчислюються переміщення, деформації та напруження в довільній точці досліджуваної області. Якщо форма функції елемента задана, точність обчислених фізичних величин (таких як переміщення, деформації та напруження) залежить від розміру елементів, тобто для досягнення високої точності слід використовувати велику кількість малих елементів.

Існують теоретичні дослідження, присвячені точності методу скінченних елементів. Наприклад, на інтервалі  $[a, b]$  точність розв’язку методом скінченних елементів за умови постановки задачі у межах теорії пружності оцінюється наступним чином [9]:

$$\|u - u_h\|_m = \sqrt{\int_a^b \sum_{i=0}^m \left( \frac{d^i u}{dx^i} - \frac{d^i u_h}{dx^i} \right)^2 dx} \leq ch^{k+1-m} \quad (3)$$

де  $u$  – точний розв’язок,  $h$  – характерний розмір елемента (наприклад, крок сітки),  $u_h$  – розв’язок, отриманий методом скінченних елементів,  $c$  – деяка константа,  $k$  – ступінь базисної функції (полінома), а  $2m$  – порядок диференціального рівняння, яке розв’язується. Зазначимо, що у випадку  $m = 1$ :

$$\|u - u_h\|_1 = \sqrt{\int_a^b \left[ (u - u_h)^2 + \left( \frac{du}{dx} - \frac{du_h}{dx} \right)^2 \right] dx} \leq ch^k \quad (4)$$

З наведеного рівняння видно, що чим менший розмір елемента та вищий порядок базисних функцій, тим ближчим буде розв’язок МСЕ до точного. Зі зменшенням розміру елементів зростає як загальна кількість елементів, так і час обчислень. З точки зору обчислювального навантаження основні процеси МСЕ включають:

- побудову глобальної матриці жорсткості  $[K]$ ,
- розв’язання системи лінійних рівнянь, у якій  $[K]$  виступає як матриця коефіцієнтів (1).

Що стосується першого процесу, обчислювальне навантаження є пропорційним до загальної кількості елементів у області. Розглянемо випадок, коли двовимірну прямокутну область рівномірно поділено на чотирикутні елементи. Якщо довжину сторони

елемента зменшити удвічі, то загальна кількість елементів, а також навантаження, необхідне для побудови глобальної матриці жорсткості, збільшується в 4 рази. У тривимірному випадку, якщо гексаедр рівномірно поділити на менші гексаедричні елементи, зменшення довжини сторони удвічі призводить до восьмиразового збільшення кількості елементів і відповідно обчислювального навантаження.

З іншого боку, час, необхідний для розв'язання системи лінійних рівнянь із матрицею коефіцієнтів  $[K]$  (1), також збільшується зі зростанням кількості елементів. Існують два основні підходи до розв'язання таких систем: прямий метод і ітераційний метод. У прямому методі кількість невідомих послідовно зменшується до отримання остаточного розв'язку (метод виключення Гауса), тоді як в ітераційному методі початкове наближене значення розв'язку поступово уточнюється до досягнення точного вектора розв'язку (метод Гауса-Зейделя). Відомо, що загальний час, необхідний для всього процесу розв'язання, будь-яким з зазначених методів зростає пропорційно до куба кількості невідомих. Досліджуваний обчислювальний процес складається з двох підпроцесів, один з яких має складність  $O(n)$ , а інший –  $O(n^3)$ , то при великих значеннях  $n$  домінує підпроцес зі складністю  $O(n^3)$ . Отже загальна обчислювальна складність МСЕ –  $O(n^3)$ .

Наприклад, розглянемо двовимірну прямокутну область, поділену на чотирикутні елементи. Якщо довжину сторони елемента зменшити удвічі, загальна кількість елементів та вузлів збільшується в 4 рази, а обчислювальна складність зростає в  $4^3 = 64$  рази. В разі тривимірної області, загальна кількість елементів та вузлів збільшується в 8 разів а обчислювальна складність в  $8^3 = 512$  разів. Слід також зазначити, що наведена вище оцінка базується на припущенні, що матриця коефіцієнтів є щільною, тобто більшість її елементів ненульові. На практиці ж глобальна матриця жорсткості, яка є матрицею коефіцієнтів у методі скінченних елементів, зазвичай є розрідженою (більшість її елементів дорівнюють нулю), що свідчить про можливість суттєвого зменшення обчислювальних витрат на розв'язання.

Також відзначимо, що існують різні методи оцінки похибки розв'язку МСЕ порівняно з точним розв'язком – так звані апостеріорні методи оцінювання похибки [5, 11]. У МСЕ для задач механіки твердого тіла зазвичай використовується метод переміщень, де шуканими змінними є переміщення. У цьому підході переміщення є неперервними на межах елементів, але деформації й напруження – як похідні першого порядку – залишаються розривними. З фізичної точки зору це є неприйнятним, і така невідповідність пояснюється недостатньою неперервністю базисних функцій, які зазвичай неперервні на своїй області визначення, але не мають неперервних похідних. У результаті поле напружень, отримане методом скінченних елементів, виявляється розривним на межах елементів, що знижує точність та достовірність результатів.

Щоб подолати цю проблему, застосуємо метод згладжування напружень, відомий як ZZ-метод (Zienkiewicz–Zhu). Для вузлів, які належать кільком елементам, обчислимо напруження окремо від кожного з цих елементів, після чого візьмемо їх середнє значення. Таким чином відновлюється згладжене, неперервне поле напружень, яке є фізи-

чно коректнішим. Надалі для будь-якої точки елемента напруження інтерполюємо з використанням базисних функцій і отриманих у вузлах згладжених значень.

Зважаючи на нерівномірний характер розподілу напружено-деформованого стану в межах скінченно-елементної моделі, для оцінювання локальної точності чисельного розв'язку було застосовано метод згладжування напружень Zienkiewicz-Zhu (ZZ-метод). У межах цього підходу апостеріорна похибка визначається як різниця між напруженнями, отриманими безпосередньо з МСЕ-розрахунку, та згладженими значеннями, що дозволяє побудувати просторовий розподіл похибки та ідентифікувати області з недостатньою точністю. Така інформація є критично важливою для реалізації адаптивних стратегій: у випадках, коли локальна похибка перевищує заданий поріг, здійснюється локальне згущення сітки (h-адаптивність) або підвищення порядку апроксимації базисних функцій (p-адаптивність). ZZ-метод дозволив здійснити ефективне оцінювання якості чисельного розв'язку без необхідності знання аналітичного або точного розв'язку задачі.

У межах традиційних адаптивних стратегій апостеріорна похибка використовується опосередковано – переважно для модифікації скінченно-елементної сітки з метою підвищення точності розрахунків. Натомість у даному дослідженні запропоновано альтернативний підхід, який передбачає пряме використання інформації про похибку для покращення результатів без необхідності ремешингу. Зокрема, реалізовано архітектуру прямої нейронної мережі (feedforward neural network), яка навчається прогнозувати уточнені значення напружень, еквівалентні тим, що були б отримані на високодеталізованій сітці, на основі даних про напруження та апостеріорну похибку, обчислених на спрощеній сітці. Запропонований підхід (див. рис. 1) реалізується у три послідовні етапи [4]:

1. Етап підготовки даних: Проведено МСЕ-аналізи на спрощеній сітці при різних умовах (геометрія, навантаження, закріплення тощо), після чого обчислюється інформація про похибку методом апостеріорної оцінки. Для кожного випадку також проводиться МСЕ-аналіз на дуже уточненій сітці для наближення до істинного рішення. У результаті формується багато пар даних, що включають: рішення на спрощеній сітці, відповідну інформацію про похибку та рішення на уточненій сітці.

2. Етап навчання: Проведено навчання прямої нейронної мережі на основі зібраних пар даних.

- Вхідні дані: розв'язок на спрощеній сітці + похибка.
- Вихідні (навчальні) дані: розв'язок на уточненій сітці.

3. Етап застосування: Рішення МСЕ і його похибка на спрощеній сітці для нової задачі подані на вхід навченій нейромережі. Вона генерує відповідне уточнене рішення, яке могло би бути отримане на уточненій сітці.

Варто зазначити, що у цьому підході вхідні дані до нейромережі включають лише стан напружень і інформацію про похибку в околі певної точки – без геометрії чи граничних умов, що дозволяє легко застосовувати навчену мережу до різних задач. Крім того, оскільки вхідні дані – це лише результати зі спрощеної сітки, а сам процес перед-

бачення у нейромережі швидкий, метод дозволяє значно швидше оцінити точні значення напружень у конкретній точці, ніж традиційний МСЕ на уточненій сітці.

Можливим недоліком цього підходу є те, що можна отримати уточнені значення напружень лише в окремих точках, а не по всій області. Однак на практиці часто достатньо знати значення напружень у певній критичній точці або області. Тому підхід можна використовувати для розв'язання задач оптимального проектування, де потрібні багаторазові аналізи.

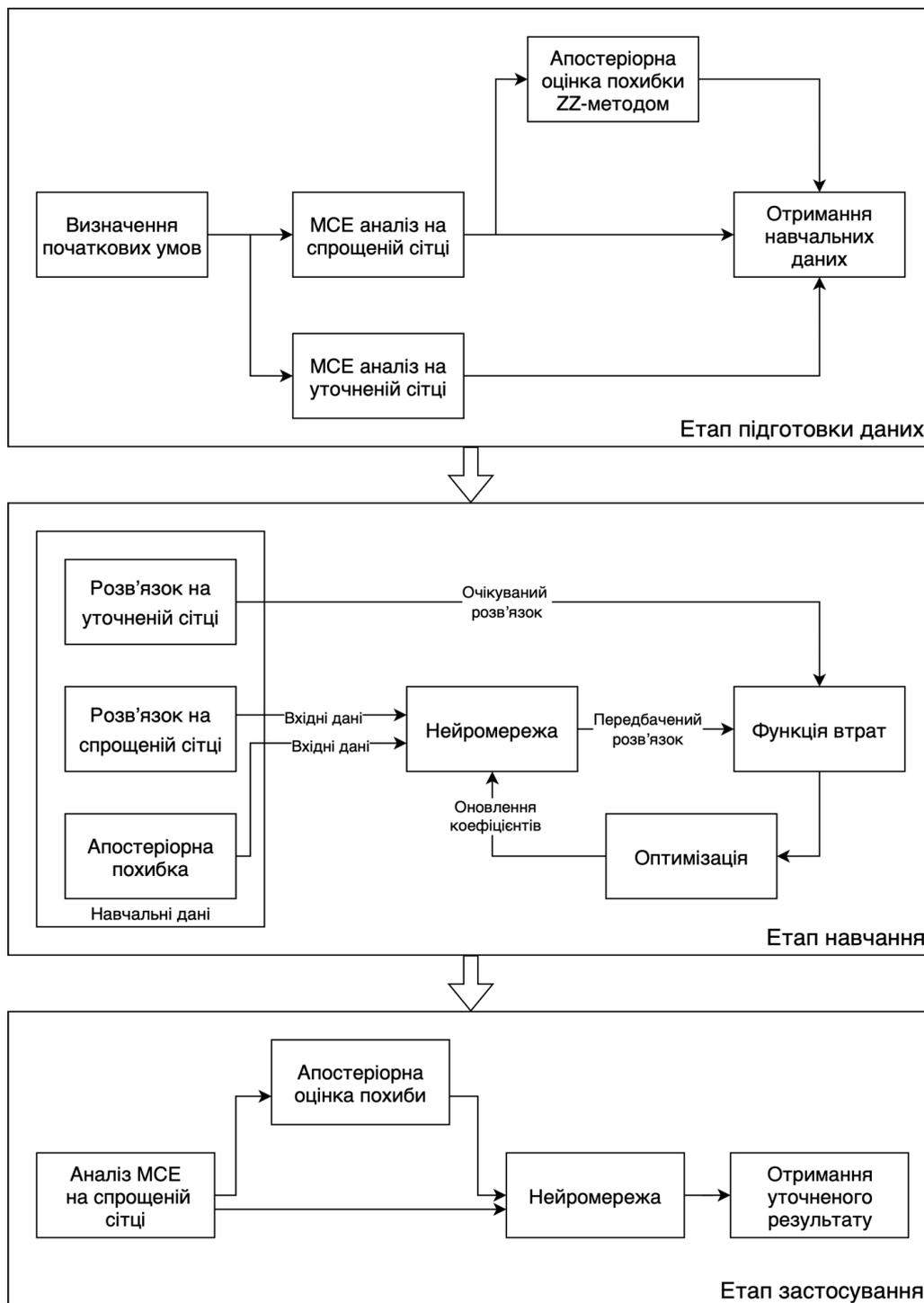


Рисунок 1 – Схема гібридного підходу: МСЕ-глибоке навчання

Розглянемо запропонований підхід та його базову ефективність в задачі двовимірного аналізу напружень із використанням чотиривузлових чотирикутних елементів [7]. Нейронну мережу прямого поширення навчаємо на напруженнях у цільовій точці, отриманих МСЕ-аналізом на уточненій сітці (використовуються як навчальні дані), а вхідними даними слугують напруження та певна інформація про похибки в цій точці та в точках навколо неї, отримані зі спрощеної сітки. В результаті навчання нейромережі стає можливим передбачати уточнені напруження в цільовій точці, коли на вхід подаються значення напружень і похибок, отриманих зі спрощеної сітки.

Вхідні дані включаються не лише напруження у самій цільовій точці, де потрібно отримати високоточні результати, але й напруження та похибки в її околі як допоміжна інформація. Для цього, як показано на рис. 2, точки оцінювання напружень розміщуються сіткою навколо цільової точки, де й формується відповідна допоміжна інформація. У цих точках обчислюються напруження та згладжені напруження, отримані з МСЕ на спрощеній сітці, а також напруження з уточненої сітки.

На основі напружень, обчислених у цільовій точці і чотирьох сусідніх точках, формуються два типи вхідних даних для нейромережі:

- На основі різниці між звичайними та згладженими напруженнями, отриманими на спрощеній сітці в цільовій точці та чотирьох сусідніх точках, формуються 15 значень (3 компоненти напружень  $\times$  5 точок). Ці дані вважаються такими, що відображають розподіл похибок у межах околу цільової точки.
- На основі різниці між напруженнями у цільовій точці та напруженнями у кожній з чотирьох сусідніх точок формуються 12 значень (3 компоненти  $\times$  4 точки), які відображають локальні зміни напружень поблизу цільової точки.

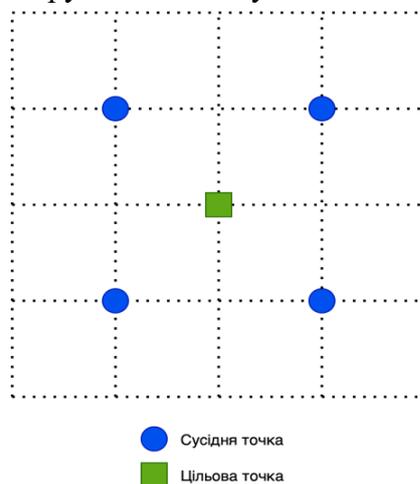


Рисунок 2 – Цільова та сусідні точки

Навчальні дані для нейромережі – це різниця між напруженнями у цільовій точці, отриманими зі спрощеної та уточненої сітки, тобто 3 значення (3 компоненти  $\times$  1 точка). Це означає, що нейромережа навчається не на екстраполяцію, а на інтерполяцію, – тобто відтворення точного значення на основі відповідності між спрощеною та уточненою сіткою.

Після того, як визначена структура вхідних і навчальних даних, генерується велика кількість навчальних прикладів, кожен з яких представляє інший стан напружень навколо цільової точки.

Для навчання прямої нейронної мережі навчальні та верифікаційні приклади випадково обрано з великого набору прикладів. Тестується набір навчальних прикладів, який складається з 5000 прикладів. Для верифікації обрано 1000 прикладів. Усі вхідні дані обчислені з результатів МСЕ-аналізу на спрощеній сітці. Кожен приклад складається з 27 елементів, а саме:

1. Різниці між напруженнями на грубій сітці та згладженими напруженнями для цільової та чотирьох сусідніх точок. Розглядаються напруження по осі  $x$ , напруження по осі  $y$  так зсувні напруження в площині  $xy$ . Отримаємо 15 значень.

2. Різниці між напруженнями у цільовій точці та кожної з 4 сусідніх точок для кожного з 3 напружень. Отже отримаємо ще 12 значень.

Таблиця 1

Розподіл похибок для напружень по осі  $x$

Похибка	-1	-0.75	-0.5	-0.25	0	0.25	0.5	0.75	1
Кількість прикладів (спрощена сітка)	37	10	28	116	637	101	32	8	32
Кількість прикладів (нейромережа)	3	1	4	35	932	19	4	1	2

У даному дослідженні використовується пряма нейронна мережа з 27 нейронами на вхідному шарі, 3 нейронами на вихідному шарі та 5 прихованими шарами з 80 нейронами у кожному. Похибка на верифікаційних даних складає 0.043.

Результати, отримані за допомогою нейронної мережі, демонструють значно вищу відповідність уточненим напруженням, порівняно з даними, отриманими на спрощеній скінченно-елементній сітці (див. табл. 1). У всіх досліджених випадках модель глибокого навчання забезпечує більш точні оцінки, наближені до результатів, що були б отримані на високодеталізованій сітці. Навчену нейронну мережу можна застосовувати до різних задач двовимірного аналізу напружень.

**Висновки.** Запропонований гібридний підхід дозволяє досягати точності, співставної з результатами традиційного моделювання на дрібних сітках, при суттєвому зниженні обчислювальної складності. Такий підхід є особливо актуальним у випадках, коли класичний МСЕ стає надмірно ресурсомістким, зокрема, при проведенні багаторазових ітераційних розрахунків, що характерно для задач оптимізації конструкцій та обчислювального дизайну. Серед ключових переваг інтеграції МСЕ з нейронними мережами слід виокремити:

- можливість оперативного отримання уточнених результатів на основі даних зі спрощеної сітки;

- збереження фізичної інтерпретованості та достовірності чисельного розв'язку;
- потенційну здатність моделі адаптуватися до нових задач без необхідності повного перенавчання;
- істотне скорочення часу моделювання, що є критично важливим для інженерної практики.

Водночас такий підхід має певні обмеження. Зокрема, він дозволяє уточнювати напруження лише у вибраних точках, без урахування геометрії чи граничних умов усієї області, а також потребує великої навчальної вибірки для досягнення високої точності. Проте така вимога водночас забезпечує широку узагальнювальну здатність моделі, що сприяє її застосовності до різних типів задач.

Для подальшого вдосконалення запропонованого підходу доцільним є формування розширеної навчальної вибірки, що дозволить підвищити точність та стабільність прогнозування. Крім того, перспективним напрямом є дослідження різних архітектур нейронних мереж з метою визначення оптимальної конфігурації для конкретних класів задач.

Отже, інтеграція МСЕ з глибоким навчанням, відкриває нові можливості для підвищення точності та швидкодії розрахунків, роблячи даний підхід перспективним для широкого впровадження в інженерних та наукових застосуваннях.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Azizzadenesheli K., Kovachki N., Li Z., Liu-Schiaffini M., Kossaifi J, Anandkumar A. Neural operators for accelerating scientific simulations and design. 2024, Nature Reviews Physics, № 5, p. 320-328. <https://www.nature.com/articles/s42254-024-00712-5>
2. Deshpande, S., Sosa, R.I., Bordas, S.P., & Lengiewicz, J. Convolution, aggregation and attention based deep neural networks for accelerating simulations in mechanics. *Frontiers in Materials*, 2022. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1128954>
3. Foucart, C., Charous, A., and Lermusiaux, P. F. J., Deep Reinforcement Learning for Adaptive Mesh Refinement, *Journal of Computational Physics*, Volume 491, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2023.112381>.
4. Hammad MM. Artificial Neural Network and Deep Learning: Fundamentals and Theory. arXiv preprint arXiv:2408.16002, 2024.
5. Johnson K.L. Contact Mechanics, Cambridge University Press, 1985, <https://doi.org/10.1017/CBO9781139171731>
6. Morozov Y., Zaytseva T., Novikova O. Use of deep learning in contact mechanics. Modern scientific and technical research in the context of linguistic space (in English): Conference materials of the IV All-Ukrainian scientific and practical conference of young scholars and higher education applicants, Dnipro, May 15, 2025. P. 292-293. [https://www.dnu.dp.ua/docs/ndc/2025/materiali\\_konferentciy/13.pdf](https://www.dnu.dp.ua/docs/ndc/2025/materiali_konferentciy/13.pdf)
7. Oishi A., Yagawa G. Finite elements using neural networks and a posteriori error. *Arch. Comput. Methods Eng.* 28, 3433-3456, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11831-020-09507-0>
8. Raissi M., Perdikaris P., Karniadakis G.E. Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *J. Comput. Phys.* 378, 686–707, 2019.

<https://doi.org/10.1016/j.jcp.2018.10.045>

9. Reddy, J.N. An Introduction to the Finite Element Method (Second Edition). McGraw-Hill, 1993
10. Yagawa G., Oishi A. Computational Mechanics with Deep Learning. An Introduction. Springer Cham, 2023. <https://doi.org/10.1007/978-3-031-11847-0>
11. Zienkiewicz, O.C., Morgan, K. Finite Elements & Approximation. Dover Publications, 2013
12. Nath D., Ankit Neog D.R. Application of Machine Learning and Deep Learning in Finite Element Analysis: A Comprehensive Review. *Arch Computat Methods Eng* 31, 2945–2984, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11831-024-10063-0>

Received 02.09.2025.

Accepted 08.09.2025.

### ***Application of deep learning for improving the efficiency of solving contact mechanics problems by the finite element method***

*The finite element method (FEM) is one of the most widely used numerical techniques for modeling problems in contact mechanics. Despite its universality, FEM has well-known limitations, particularly when solving nonlinear, multiscale, or singular problems that require highly refined meshes and therefore lead to a sharp increase in computational cost. Recent advances in machine learning, especially deep learning, have demonstrated significant potential to improve numerical simulations. Physics-Informed Neural Networks (PINNs), convolutional neural networks (CNNs), and neural operators have been successfully applied in computational mechanics to accelerate calculations, predict stress and displacement fields, and adaptively refine meshes. These developments indicate that hybrid approaches combining FEM with neural networks can overcome the shortcomings of classical methods.*

*The purpose of this research is to integrate FEM with deep learning tools in order to increase accuracy and efficiency in solving contact mechanics problems. A hybrid approach is proposed in which coarse-mesh FEM results are supplemented with error information and refined using a feedforward neural network. The input data include stress states and error values in the vicinity of a target point, while the reference data are obtained from fine-mesh FEM simulations. This makes it possible to apply the trained model flexibly to new problems without the need for remeshing or direct use of geometric and boundary conditions.*

*The method was tested on two-dimensional stress analysis problems using quadrilateral elements. Datasets of training and verification examples were generated, where each example included the difference between stresses from coarse and fine meshes as well as local error information and feedforward neural network with five hidden layers of eighty neurons each was investigated. The results show that the neural network significantly reduces error compared to coarse-mesh FEM, producing stresses much closer to those obtained with fine meshes while requiring considerably fewer computational resources.*

*The study demonstrates that integrating FEM with deep learning provides an effective balance between accuracy and efficiency. The hybrid approach allows for reliable stress prediction with reduced computational cost, which is especially valuable for multiscale problems and cases requiring repeated analyses such as optimization and computational design. Alt-*

*though the method currently provides refined solutions primarily at selected points and requires large training datasets, its adaptability and ability to accelerate calculations make it a promising tool for future applications in engineering and scientific simulations.*

*Keywords: deep learning, neural network, contact mechanics, finite element method, Zienkiewicz–Zhu method, machine learning, a posteriori error, stress distribution, computational complexity, Python, Ansys.*

**Морозов Юрій Сергійович** – аспірант кафедри комп’ютерних технологій за спеціальністю F1 Прикладна математика, факультет прикладної математики та інформаційних технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3869-7124>

**Зайцева Тетяна Анатоліївна** – кандидат технічних наук, доцент, зав. каф. комп’ютерних технологій, факультет прикладної математики та інформаційних технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6346-3390>

**Yurii Serhiiovych Morozov** – PhD student at the Department of Computer Technologies, specializing in F1 Applied Mathematics, Faculty of Applied Mathematics and Information Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, ORCID: <https://orcid.org/0009-0006-3869-7124>

**Tetyana Anatoliivna Zaytseva** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Computer Technologies, Faculty of Applied Mathematics and Information Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6346-3390>

І.О. Козлюк, Д.І. Прокопович-Ткаченко

## **ПРОСТОРОВЕ МОДЕЛЮВАННЯ РИЗИКІВ ВИТОКУ ІНФОРМАЦІЇ В ОФІСНИХ МЕРЕЖАХ: ПОБУДОВА КОНТРОЛЬОВАНОЇ ЗОНИ**

*Анотація. Актуальність дослідження зумовлена зростанням ризиків витоку конфіденційної інформації в офісних мережах через електромагнітні випромінювання технічних засобів. Сучасні офісні середовища насичені бездротовими сервісами, і навіть малопотужні сигнали, що виходять за межі приміщення, здатні формувати технічні канали радіовитоку. Це створює потребу у побудові науково обґрунтованих моделей для прогнозування зон уразливості та планування захисних заходів. Проблема полягає у відсутності універсальних методів кількісної оцінки просторових ризиків, що враховували б різні типи будівельних матеріалів та параметри внутрішнього середовища. Існуючі емпіричні підходи обмежені точністю або є надмірно трудомісткими для практичного використання у системах інформаційної безпеки. Метою статті є розробка просторово-математичної моделі для визначення та оптимізації «контрольованої зони» у межах офісних приміщень, де рівень сигналу гарантовано знижується нижче порогу детекції засобами несанкціонованого прийому. Методи дослідження базуються на модифікованій моделі Хата з адаптацією до внутрішніх середовищ шляхом урахування коефіцієнтів поглинання будівельних матеріалів та експоненційного закону загасання. Для формування карти уразливості застосовано бінарну матрицю покриття, а оптимізація розміщення датчиків витоку виконана за критерієм максимального перекриття з урахуванням бюджетних обмежень. У результаті побудовано узгоджену методику просторового моделювання ризиків, яка підтверджена на експериментальному кейсі типового офісу. Встановлено, що межа згасання сигналу при частоті 96,1 МГц і потужності 2,3 мВт формується на відстанях понад 10 м, а рекомендована контрольована зона становить близько 24×8,5 м. Модель забезпечує можливість точного прогнозування зон радіовитоку та оптимізації кількості датчиків. Ключові висновки полягають у тому, що застосування адаптованої моделі Хата та матричного подання покриття дозволяє ефективно визначати просторові ризики витоку інформації, а також інтегрувати ці результати у системи управління інформаційною безпекою відповідно до стандартів ISO/IEC 27005 і національних нормативів у сфері ТЗІ. Отримані результати мають практичну значущість для державних органів, бізнес-центрів та об'єктів критичної інфраструктури.*

*Ключові слова: радіовиток, модель Хата, контрольована зона, офісна мережа, інформаційна безпека, електромагнітне випромінювання, проникність сигналу,*

**Вступ.** Сучасні офісні середовища насичені радіотехнічними засобами — від корпоративних точок доступу IEEE 802.11ax до мобільних терміналів, IoT-пристроїв і допоміжних бездротових сервісів (Bluetooth, LoRa, NFC). За наявності чутливих даних навіть малопотужні випромінювання, які перетинають межі приміщення, здатні формувати технічні канали радіовитоку. Проблема посилюється різноманіттям будівельних матеріалів, неоднорідною внутрішньою планувальною структурою та стохастичною поведінкою користувачів (відкриття дверей, переміщення людей, перемикання режимів точок доступу). Тому постає завдання *просторового* аналізу ризику витоку інформації через радіосигнали з орієнтацією на проектування контрольованих зон — ділянок, у межах яких рівень поля гарантовано знижується нижче детекційного порогу несанкціонованого приймача.

**Постановка проблеми.** Сучасні офісні середовища характеризуються високою щільністю бездротових сервісів (Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, мобільні термінали, IoT-пристрої), які створюють потенційні технічні канали витоку конфіденційної інформації через електромагнітні випромінювання. Навіть малопотужні сигнали, що перетинають межі приміщення, можуть бути зафіксовані сторонніми приймальними засобами, що становить загрозу для інформаційної безпеки. Існуючі емпіричні моделі поширення сигналу обмежено відображають вплив будівельних матеріалів та внутрішнього планування, тоді як методи вимірювального зондування є ресурсомісткими й непридатними для оперативного планування. Водночас національні та міжнародні стандарти у сфері технічного захисту інформації вимагають науково обґрунтованих підходів до визначення контрольованих зон, у межах яких рівень сигналу гарантовано знижується нижче детекційного порогу. Це зумовлює потребу у розробці математичних моделей та інженерних методик, які б дозволяли кількісно оцінювати просторові ризики радіовитоку, формувати карти уразливості та оптимізувати розміщення датчиків контролю для зниження ймовірності несанкціонованого перехоплення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз свідчить, що класичні радіопропагаційні моделі (Окумура—Хата та їх модифікації COST-231, Вальфіш—Ікегамі) заклали основу для прогнозування загасання та радіусів дії у щільній міській та коридорній забудові, проте у первинному вигляді вони недостатньо враховують внутрішньобудинкові втрати та матеріали огорожувальних конструкцій [1–5]. Для indoor-середовищ ключову роль відіграють рекомендації ITU-R P.1238 (втрати у приміщеннях) та P.525 (вільний простір), які забезпечують узгоджені параметри для різних частот і типів будівель [6], [7]; водночас узагальнені каналні моделі 3GPP TR 38.901 для сценарію Indoor Hotspot наближають розрахунки до реальних планувань і режимів трафіку [9], [24]. Емпіричні роботи з проникності сигналів через типові матеріали (моделі Кінана—Мотлі, Сайдела—Раппапорта, Хашемі та подальші дослідження) демонструють високі варіації втрат для бетону, цегли, скла й гіпсокартону, а також значущість багатопляхового поширення та стохастичних

флуктуацій [10–12]. Паралельно стрімкий розвиток Wi-Fi 6/6E (IEEE 802.11ax) — OFDMA, UL MU-MIMO, щільне розгортання — змінює просторовий профіль випромінювання та режими енергокерування, що потребує оновлених підходів до оцінки зони уразливості і детекційних порогів [13–15], [20–23], [25–27]. Додатковий масив робіт фокусується на нецільових випромінюваннях/ЕМІ-еманаціях та на ефективності екранування (решітчасті клітки Фарадея, композитні та графенові матеріали), пропонуючи метрологічні підходи та матеріальні рішення для зниження ризиків радіовитоку [17–23]. З погляду управління ризиками, міжнародні стандарти ISO/IEC 27005 та національні нормативи у сфері ТЗІ (разом із практичними настановами CERT-UA) інтегрують просторово-планувальні та технічні заходи у керовані процедури оцінювання й оброблення загроз, але залишають досліднику свободу вибору конкретних інженерних моделей для пов'язання «поріг детекції — площа ризику» [16–18], [28–30]. Узагальнюючи, у наявній літературі бракує уніфікованих методик, що одночасно (i) поєднують аналітичну основу на кшталт Хата/ITU-R із локальним калібруванням на матеріали будівлі, (ii) явно інкорпорують детекційні пороги цільових сервісів (FM/Wi-Fi/LoRa) у просторі приміщення, та (iii) дають алгоритмічні засоби оптимізації розміщення датчиків витоку з урахуванням бюджетних обмежень. Запропонований у статті підхід заповнює ці прогалини через адаптовану модель Хата з експоненційною проникністю, побудову бінарної матриці покриття та greedy-критерій максимального перекриття для сенсорної мережі, що узгоджується з практиками Indoor Hotspot і вимогами управління ризиками ІБ [1–7], [9–18], [20–24], [28–30].

**Метою статті** є побудова адаптованої просторової моделі радіопроникності для виявлення та оптимізації контрольованої зони з урахуванням будівельних матеріалів і детекційних порогів. Для досягнення мети розв'язано такі завдання: (1) формалізовано поширення в приміщеннях на основі модифікованої моделі Хата та експоненційної проникності; (2) запропоновано матричне подання покриття й алгоритм оцінювання площі ризику; (3) розроблено критерій оптимального розміщення датчиків (детекторів витоку) на основі максимального перекриття й бюджетних обмежень; (4) верифіковано модель на кейсі типового офісу та обговорено практичні рекомендації для державних органів, бізнес-центрів і критичної інфраструктури.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Методичний підхід базується на адаптації класичної моделі Хата [1]–[5] до умов внутрішніх приміщень із використанням параметрів, визначених у рекомендаціях ITU-R P.1238 та P.2109 [6], [13]. Для уточнення втрат у каналі застосовано емпіричні коефіцієнти проникності для бетону, цегли, скла та гіпсокартону [10]–[12]. Формування карти уразливості виконується на основі побудови бінарної матриці покриття, де порогові значення узгоджені з практиками вимірювань Indoor Hotspot (3GPP TR 38.901) [9], [14]. Оптимізація розміщення датчиків витоку інформації здійснюється за критерієм максимального перекриття з урахуванням бюджетних обмежень [16], [17], [22].

### Параметризація каналів і модифікація моделі Хата

Для передбачення втрат у межах будівель використовуємо класичну форму Хата з поправкою на внутрішнє середовище через адитивну константу  $C$  та функцію ефективної висоти приймача  $a(h_r)$ :

$$L(\text{dB}) = 69.55 + 26.16\log_{10}(f) - 13.82\log_{10}(h_t) - a(h_r) + (44.9 - 6.55\log_{10}(h_t))\log_{10}(d) + C \quad (1)$$

де  $f$  — частота в МГц,  $h_t$  — ефективна висота передавача,  $d$  — відстань у кілометрах. Для міської щільної забудови беремо  $a(h_r) = (1.1\log_{10}f - 0.7)h_r - (1.56\log_{10}f - 0.8)$  [1], а  $C$  калібруємо за ITU-R P.1238/P.2109 для відповідного типу будівлі [6], [13]. Така форма зручна для референтного оцінювання, після чого проводиться локальне уточнення за експоненціальним законом проникності, що враховує матеріали.

### Моделювання проникності крізь матеріали

Сумарна залишкова потужність після проходження товщі огорожувальних конструкцій описується:

$$P_{\text{residual}} = P_0 \cdot e^{-\mu x} \cdot \prod_{i=1}^n \gamma_i, \quad (2)$$

де  $P_0$  — випромінена потужність,  $\mu$  — питомий коефіцієнт загасання (лінійний еквівалент відповідних дБ/м),  $x$  — ефективна товщина шляху крізь матеріал,  $\gamma_i \in (0,1)$  — коефіцієнти проникності для  $i$ -тих сегментів (перегородки, двері, скло). Параметри  $\mu$  і  $\gamma_i$  обираються на підставі експериментальних таблиць втрат для бетону, цегли, гіпсокартону та скла [10]–[12], з урахуванням будівельного плану.

### Матриця покриття та карта уразливості

Дискретизуємо площу приміщення на прямокутну сітку з кроком  $\Delta x = \Delta y$ . Для кожної комірки  $(i, j)$  обчислюємо відстань до номінального джерела, прогнозні втрати  $L$  за (1) і залишкову потужність за (2). Далі формуємо бінарну матрицю

$$M_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } P_{\text{residual}}^{i,j} \geq P_{\text{th}}, \\ 0, & \text{інакше,} \end{cases} \quad (3)$$

де  $P_{\text{th}}$  — детекційний поріг несанкціонованого приймача (за обраним каналом і смугою), узгоджений з практиками вимірювань для Indoor Hotspot [9], [14], [15]. Поле  $M$  інтерпретується як карта уразливості:  $M = 1$  означає перевищення порога, тож така зона має потрапляти до контрольованої області, де кабельні лінії, екрани та правила розміщення знижують ризик.

### Оптимальне розміщення датчиків

Нехай множина кандидатних позицій датчиків (детекторів витоку) позначена як  $\Omega$ , а  $k$  — їхня кількість, обмежена бюджетом  $N_{\text{max}}$ . Використаємо критерій

максимального покриття з пеналізацією перекриттів. У спрощеному варіанті greedy-алгоритму цільова функція записується:

$$\sum_{(i,j) \in \Omega} M_{i,j} \rightarrow \max \quad \text{при } k \leq N_{\max}, \quad (4)$$

де на кожній ітерації вибираємо позицію датчика, що дає найбільший приріст у покритті (кількість  $M_{i,j} = 1$ ), доки не буде вичерпано бюджет. Для посилення стійкості враховуємо ваги клітинок, що прилягають до зовнішніх огорожень, і обмеження на мінімальні інтервали між датчиками, щоб уникнути надмірного перекриття.

#### **Порогові рівні та відповідність стандартам**

Детекційний поріг  $P_{th}$  обирається з урахуванням типу цільового сервісу (FM, Wi-Fi/802.11ax, LoRa), смуги приймача, часової/частотної агрегації та нормативних вимог до вимірювання поля. Метод узгоджується із загальними підходами побудови моделей ризику (ISO/IEC 27005) [16]–[18] та національними документами у сфері ТЗІ щодо контрольованих зон, засобів екранування та моніторингу [19]–[23].

У результаті викладених підходів було сформовано узгоджену методику просторового моделювання ризиків радіовиток у офісних мережах. Адаптована модель Хата з урахуванням будівельних матеріалів дозволяє поєднати аналітичний прогноз із емпіричними коефіцієнтами проникності, визначеними в експериментальних дослідженнях [10]–[12], що відповідає рекомендаціям ITU-R P.1238 та P.2109 [6], [13]. Застосування експоненційного закону загасання дало змогу оцінити залишкову потужність сигналу після проходження крізь конструктивні елементи приміщення, а побудова бінарної матриці покриття забезпечила візуалізацію зони уразливості відповідно до вимог сценаріїв Indoor Hotspot [9], [14]. Запропонована процедура оптимального розміщення датчиків виток інформації на основі критерію максимального перекриття враховує технічні параметри та бюджетні обмеження і узгоджується з практиками управління ризиками інформаційної безпеки ISO/IEC 27005 [16]–[18], [22]. Отримані результати створюють комплексну методичну основу для виявлення та зниження ймовірності технічних каналів виток інформації.

#### **Результати**

##### **Опис кейсу й налаштування**

Розглядаємо типовий офіс розміром  $28 \times 10$  м зі сталевозалізобетонними перекриттями. Випромінювач розташований поблизу геометричного центра (14 м; 5 м) і працює на частоті  $f = 96,1$  МГц із початковою потужністю  $P_0 = 2,3$  мВт. Для бетону беремо показник загасання  $\mu$  з еквівалентом близько  $12,5$  дБ/м (для типових товщ), що відповідає сильним втратам проникності [10]–[12]. Детекційний поріг умовно фіксуємо на рівні  $P_{th} = 10^{-6}$  Вт (значення для ілюстративних розрахунків у FM-діпазоні з урахуванням смуги приймача) [6], [13]–[15].

На площині будуємо матрицю  $M$  за (3). При  $d > 10$  м через стінові перешкоди залишкова потужність у більшості напрямків опускається нижче порога, тому межа

просторового згасання фіксується на рівнях, що обмежують коридорну частину. За результатом моделювання контрольована зона (ділянка, де  $M = 1$  і вимагається технічна протидія витоку) становить **приблизно  $24 \times 8,5$  м**. Це узгоджується з відомими індексами Building Entry Loss і висновками ITU-R для масивних огорожувальних конструкцій [13], [14].

**Характеристики матеріалів**

Наведемо узагальнені значення проникності (на ілюстративних частотах і стандартних товщинах), що використовувались для калібрування коефіцієнтів моделі:

Таблиця 1

Характеристики поширення сигналу для різних типів перекриттів

Тип перекриття	Питомий коефіцієнт загасання, дБ/м	Проникність, %
Бетон армований	12.5	4.2
Цегла	6.8	13.5
Гіпсова стіна	3.2	28.0
Скло (багатошарове)	5.4	18.3

Аналіз просторового поширення сигналів у приміщеннях є ключовим для забезпечення стабільності електронних комунікацій та контролю інформаційної безпеки. Візуалізація у вигляді двовимірних карт дозволяє оцінити рівень сигналу на різних відстанях від джерела та визначити зони гарантованого прийому. Це важливо як для технічного планування розміщення обладнання, так і для виявлення потенційних вразливих ділянок у мережевій інфраструктурі.

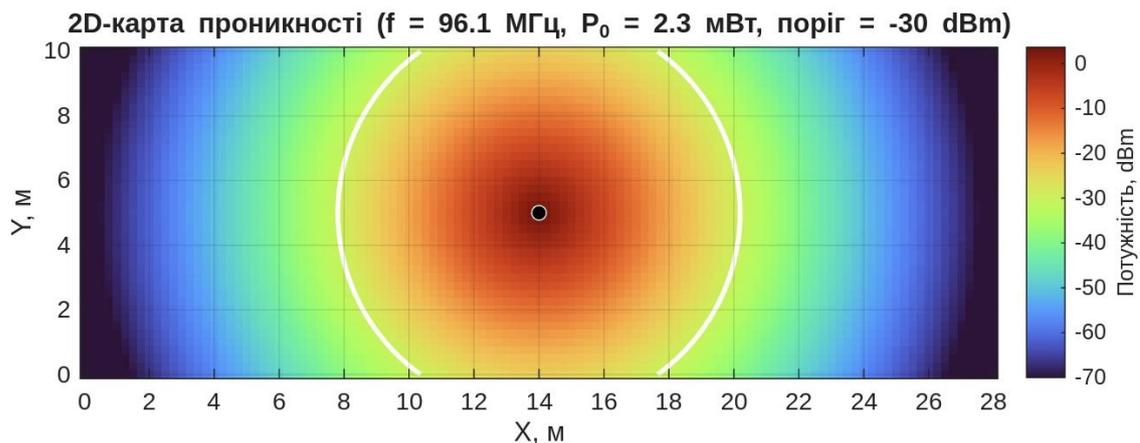


Рисунок 1 – 2D-карта проникності

На рис. 1 зона відображена проникності сигналу у приміщенні. Сіра зона відповідає перевищенню порогу детекції; біла — повне загасання сигналу.

На рисунку наведено детальну 2D-карту проникності сигналу у типових умовах приміщення. По горизонтальній осі відкладено координату X у метрах, по вертикальній

— координату  $Y$ , що дозволяє однозначно локалізувати будь-яку точку простору. Кольорова шкала, розташована праворуч від основного поля зображення, ілюструє спектр рівнів потужності сигналу: насичені червоні зони відповідають максимальним значенням, а жовті, зелені, блакитні та сині поступово відображають зниження інтенсивності сигналу в напрямку до периферії карти. Фіолетові ділянки свідчать про практично повне загасання хвиль—ці області потенційно є "мертвими зонами" для прийому.

Центральна точка карти вказує на розташування передавача, що генерує сигнал. Від нього хвилі поширюються в усі боки, а форма ізоліній на полі демонструє вплив стін, меблів і матеріалів на розподіл потужності в просторі. Біле коло виділяє межу зони гарантованого прийому, в якій рівень сигналу перевищує встановлений поріг, необхідний для стабільної роботи обладнання. За межами цієї області настає швидке зниження якості зв'язку.

Таким чином, карта наочно демонструє складну геометрію поширення сигналу та дозволяє оперативно ідентифікувати як зони надійного зв'язку, так і ділянки, де необхідно посилити покриття чи оптимізувати розміщення обладнання. Вона є важливим інструментом для планування мережі, дає змогу оцінити вплив об'єктів інтер'єру на якість сигналу та допомагає визначати граничні умови для подальшого проектування й захисту інформаційної інфраструктури.

#### Оптимізація числа датчиків

Для оцінки вартості та ефекту перекриття покажемо приклад таблиці рішень при варіації бюджету  $N_{\max}$ :

Таблиця 2

Вплив кількості датчиків на покриття контрольованої зони

Площа, %	Середня відстань між датчиками, м	Орієнтовні витрати, од.
42	--	1.0
67	16	1.9
81	12	2.7
89	10	3.5
92	9	4.3

Спостерігається типова нелінійність: після 3–4 датчиків приріст покриття зменшується, що узгоджується з логікою задачі максимального покриття та доцільністю з урахуванням бюджету і вимог експлуатації [16], [17], [22].

Пояснення до таблиці.

Наведені у таблиці значення «Орієнтовні витрати» не відображають реальну грошову вартість датчиків, а є умовним індикатором, отриманим у межах математичної моделі оптимізації. За основу прийнято, що один датчик відповідає одиниці витрат.

Подальше збільшення їх кількості приводить до майже пропорційного зростання витрат, оскільки враховується не лише обладнання, а й супутні ресурси — монтаж, живлення та інтеграція в систему моніторингу. Водночас ефект покриття демонструє спадну віддачу: кожен додатковий датчик покращує контроль лише частково, а приріст площі поступово зменшується. Саме тому після 3–4 датчиків спостерігається насичення, і подальше розширення мережі сенсорів уже менш ефективно з точки зору співвідношення «витрати—результат».

*Порівняння з альтернативами.* Статистичне зондування *ex post* (вимірювання рівнів поля у вузлових точках з подальшою інтерполяцією) забезпечує високу емпіричну точність, але є трудомістким і прив'язаним до конкретного планування та моменту часу [11], [12]. Камеральні методи «електронного щита» пропонують визначати обов'язкові фізичні бар'єри, екрани, шари з високою провідністю і феромагнітністю та регламенти зонування, однак часто *переоцінюють* потребу в матеріалах і не дають кількісної границі «порог детекції — площа ризику» [13], [19], [21]. Запропонована модель поєднує *аналітичний* прогноз (Hata/ITU-R) та *локальне* калібрування проникності для специфічних матеріалів, що зменшує невизначеність і допомагає приймати рішення щодо розміщення датчиків і зонування без надлишкових витрат.

*Адекватність та обмеження.* Основне припущення — квазістаціонарність карти втрат на часовому інтервалі планування: багатошляхові флуктуації й динаміка людей моделюються через поправки до  $\mu$  та  $\gamma_i$  в межах сценарного аналізу [12], [14]. Модель свідомо ігнорує детальну багатопрорієктивність (ray-tracing), фокусуючись на консервативних оцінках проникності; це призводить до *завищення* контрольованої зони, що у безпекових застосуваннях є прийнятним. Для високих частот (5–7 ГГц, Wi-Fi 6E) роль поверхневих і дифракційних втрат зростає, тож параметри  $C$  і  $\mu$  потребують переналаштування за ITU-R P.1238/P.2109 і локальними замірами [6], [13], [15].

*Інтеграція з управлінням ризиками.* У системах менеджменту ІБ (ISO/IEC 27001/27005) запропонована карта  $M$  виступає природним артефактом для *реєстру ризиків*: кожній клітинці зі значенням 1 привласнюється сценарій радіовитоків з оціненою ймовірністю та впливом. Комбінація з нормами на кабельну інфраструктуру (EN 50174-2) і стандартами електромагнітної сумісності (IEC 61000-4-20) формує відтворюваний процес планування й верифікації [22], [23]. Практичні настанови CERT-UA щодо операційного моніторингу та оброблення інцидентів можуть бути використані для налаштування порогів  $P_{th}$  і процедур реагування [28]–[30].

*Перспективи розвитку.* (1) Інтеграція з картами Wi-Fi/LoRa покриття та 3D-моделювання поверхів для складних багатоярусних офісів; (2) використання *динамічних* порогів з урахуванням часу доби, щільності користувачів, режимів енергокерування 802.11ax; (3) автоматизований підбір розміщення датчиків за допомогою комбінаторної оптимізації (ILP/CP-SAT) або евристик; (4) введення

довірчих інтервалів для площі контрольованої зони та сценарне планування «крайніх випадків»; (5) формування процедур приймально-контрольних випробувань згідно з національними вимогами ТЗІ [19]–[23].

**Висновки.** Розроблено просторово-математичну модель для кількісної оцінки радіовитоків в офісних мережах на основі модифікованої моделі Хата з коригуванням параметрів проникності будівельних матеріалів і формуванням матриці покриття  $M$ . 2) Запропоновано алгоритм оптимального розміщення датчиків за критерієм максимального перекриття за бюджетних обмежень, що демонструє зменшення граничної невизначеності після 3–4 датчиків. 3) На кейсі ( $f = 96,1$  МГц,  $P_0 = 2,3$  мВт,  $28 \times 10$  м, залізобетон) показано, що межа згасання на відстанях понад 10 м відповідає формуванню *контрольованої зони* приблизно  $24 \times 8,5$  м, що узгоджується з оцінками ITU-R для Building Entry Loss. 4) Методика придатна для регламентів інформаційної безпеки, охоронних і промислових систем — від первинного планування й закупівель до приймально-контрольних випробувань. 5) Запропоновані підходи відповідають практикам ISO/IEC 27005 і національним нормам ТЗІ та можуть бути розширені до 3D-моделей і інтегровані з інструментами операційного моніторингу (CERT-рекомендації) з метою системного зниження ризику технічних каналів витоку.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. MacCartney G. R., Rappaport T. S., Sun S., Deng S. Indoor office wideband millimeter wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for Ultra Dense 5G Wireless Networks. IEEE Access. 2015. Vol. 3. P. 2388–2424. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2486778>.
2. Ju S., Xing Y., Kanhere O., Rappaport T. S. Millimeter Wave and Sub Terahertz Spatial Statistical Channel Model for an Indoor Office Building. IEEE Journal on Selected Areas in Communications. 2021. Vol. 39, No. 6. P. 1561–1575. DOI: <https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3071844>.
3. Obeidat H. A., et al. An Indoor Path Loss Prediction Model Using Wall Correction Factors. Radio Science. 2018. Vol. 53, No. 4. P. 544–558. DOI: <https://doi.org/10.1002/2018RS006536>.
4. Lee J., Kim K.-W., Kim M.-D., Park J.-J. Measurement Based Millimeter Wave Angular and Delay Dispersion Characteristics of Outdoor to Indoor Propagation for 5G Millimeter Wave Systems. IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 150492–150504. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2947704>.
5. Oladimeji T. T., Kumar P., Elmezughi M. K. Path Loss Measurements and Model Analysis in an Indoor Corridor Environment at 28 GHz and 38 GHz. Sensors. 2022. Vol. 22, No. 19. Art. 7642. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22197642>.
6. Jun S. Y., Caudill D., Chuang J., et al. Penetration Loss at 60 GHz for Indoor to Indoor and Outdoor to Indoor Mobile Scenarios. Proc. IEEE EuCAP. 2020. DOI: <https://doi.org/10.23919/EuCAP48036.2020.9135581>.

7. Carneiro de Souza L., de Souza Lopes C. H., dos Santos R. C. C., Cerqueira Sodré Junior A., Mendes L. L. A Study on Propagation Models for 60 GHz Signals in Indoor Environments. *Frontiers in Communications and Networks*. 2022. Vol. 2. Art. 757842. DOI: <https://doi.org/10.3389/frcmn.2021.757842>.
8. Koppel T., Shishkin A., Haldre H., Toropovs N., Vilcane I., Tint P. Reflection and transmission properties of common construction materials at 2.4 GHz frequency. *Energy Procedia*. 2017. Vol. 113. P. 158–165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.045>.
9. García Sánchez M., Iglesias C., Cuiñas I., Expósito I. Building Penetration Losses at 3.5 GHz: Dependence on Polarization and Incidence Angle. *Electronics*. 2022. Vol. 12, No. 1. Art. 106. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics12010106>.
10. Rappaport T. S., MacCartney G. R., Samimi M. K., Sun S. Wideband millimeter wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design. *IEEE Communications Magazine*. 2015. Vol. 52, No. 9. P. 116–122. DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7374064>.
11. Al Samman A. M., Rahman T. A., Chebil J., Mohamad H., Islam M. R. Comparative Study of Indoor Propagation Model Below and Above 6 GHz. *Electronics*. 2019. Vol. 8, No. 1. Art. 44. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics8010044>.
12. Bullmann M., Fetzer T., Ebner F., Deinzer F., Grzegorzec M. Comparison of 2.4 GHz WiFi FTM and RSSI Based Indoor Positioning Methods in Realistic Scenarios. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 16. Art. 4515. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20164515>.
13. Bellalta B., Kosek Szott K. AP initiated multi user transmissions in IEEE 802.11ax WLANs. *Ad Hoc Networks*. 2019. Vol. 85. P. 145–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.10.021>.
14. Fukuda Y., et al. Characterizing the Basic Performance of IEEE 802.11ax WLANs in a Campus Environment. *Proc. IEEE/IFIP NOMS*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1109/NOMS54207.2022.9789895>.
15. Tutelian S., Ferragut J., Cerdà L., Barceló J. IEEE 802.11ax OFDMA Resource Allocation with Trigger Based Uplink Scheduling. *Sensors*. 2021. Vol. 21, No. 18. Art. 6099. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21186099>.
16. Oughton E. J., Frias Z. Revisiting Wireless Internet Connectivity: 5G vs Wi Fi 6. *Telecommunications Policy*. 2021. Vol. 45, No. 5. Art. 102095. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2021.102095>.
17. Kuhn M. G. Compromising Emanations of LCD TV Sets. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*. 2013. Vol. 55, No. 3. P. 564–570. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEMC.2013.2252353>.
18. Antić V., Dakić O., Glišović V., et al. Protecting Data at Risk of Unintentional Electromagnetic Emanations. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 11. Art. 4830. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14114830>.
19. Gifuni A., Migliaccio M., Testa O., et al. Latest developments on the shielding effectiveness measurement with reverberation chambers. *IET Science, Measurement & Technology*. 2020. Vol. 14, No. 9. P. 828–838. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2019.0242>.

21. Jakoby B., Beigelbeck R., Voglhuber Brunmaier T. Understanding the Shielding Efficiency of a Faraday Grid Cage: A Spectral Domain Approach. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*. 2023. PP(99). P. 2–11. DOI: <https://doi.org/10.1109/MAP.2022.3229287>.
22. Hamidi A., Djafri K., Ait Si Ali S. Stochastic approach to evaluate the shielding effectiveness of a composite material slab. *Electronics Letters*. 2024. Vol. 60, No. 2. e70016. DOI: <https://doi.org/10.1049/ell2.70016>.
23. Song R., et al. Graphene Assembled Films for Radio Frequency and Electromagnetic Interference Shielding. *Accounts of Materials Research*. 2024. Vol. 5, No. 9. P. 2211–2224. DOI: <https://doi.org/10.1021/accountsmr.4c00023>.
24. Ali U., De Felice M., Lissandrin N., et al. Data Driven Analysis of Outdoor to Indoor Propagation for Deployed 5G Networks at 3.5 GHz. *Future Internet*. 2022. Vol. 14, No. 8. Art. 239. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi14080239>.
25. Al Khero S. K., Abbosh Y. M. Path Loss and Channel Modeling at 3.5 GHz for 5G Cellular System. *IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering*. 2021. Vol. 1152. Art. 012006. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1152/1/012006>.
26. Horn B. K. P. Doubling the Accuracy of Indoor Positioning: Frequency Diversity. *Sensors*. 2020. Vol. 20, No. 5. Art. 1489. DOI: <https://doi.org/10.3390/s20051489>.
27. Yu Y., Chen R., Chen L., Guo G., Ye F., Liu Z. A Robust Dead Reckoning Algorithm Based on Wi Fi FTM and Multiple Sensors. *Remote Sensing*. 2019. Vol. 11, No. 5. Art. 504. DOI: <https://doi.org/10.3390/rs11050504>.
28. Banin L., Bar Shalom O., Dvorecki N., Amizur Y. Scalable Wi Fi Client Self Positioning Using Cooperative FTM Sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2018. Vol. 68, No. 10. P. 3686–3698. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2880887>.
29. Au E. The Latest Progress on IEEE 802.11mc and IEEE 802.11ai. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2016. Vol. 11, No. 3. P. 19–21. DOI: <https://doi.org/10.1109/MVT.2016.2586398>.
30. He S., Chan S. H. G. Wi Fi Fingerprint Based Indoor Positioning: Recent Advances and Comparisons. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016. Vol. 18, No. 1. P. 466–490. DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2464084>.
31. De Beelde B., Peter R., et al. Outdoor mmWave Channel Modeling for Fixed Wireless Access at 60 GHz (with Indoor Coverage Implications). *Radio Science*. 2022. Vol. 57, No. 6. e2022RS007519. DOI: <https://doi.org/10.1029/2022RS007519>.

#### REFERENCES

1. MacCartney, G.R., Rappaport, T.S., Sun, S., & Deng, S. (2015). Indoor office wideband millimeter wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for ultra-dense 5G wireless networks. *IEEE Access*, 3, 2388–2424. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2015.2486778>

2. Ju, S., Xing, Y., Kanhere, O., & Rappaport, T. S. (2021). Millimeter wave and sub-terahertz spatial statistical channel model for an indoor office building. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 39(6), 1561–1575.  
<https://doi.org/10.1109/JSAC.2021.3071844>
3. Obeidat, H. A., et al. (2018). An indoor path loss prediction model using wall correction factors. *Radio Science*, 53(4), 544–558. <https://doi.org/10.1002/2018RS006536>
4. Lee, J., Kim, K.-W., Kim, M.-D., & Park, J.-J. (2019). Measurement-based millimeter wave angular and delay dispersion characteristics of outdoor to indoor propagation for 5G millimeter wave systems. *IEEE Access*, 7, 150492–150504.  
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2947704>
5. Oladimeji, T. T., Kumar, P., & Elmezughi, M. K. (2022). Path loss measurements and model analysis in an indoor corridor environment at 28 GHz and 38 GHz. *Sensors*, 22(19), 7642. <https://doi.org/10.3390/s22197642>
6. Jun, S. Y., Caudill, D., Chuang, J., et al. (2020). Penetration loss at 60 GHz for indoor-to-indoor and outdoor-to-indoor mobile scenarios. *Proceedings of the IEEE EuCAP*. <https://doi.org/10.23919/EuCAP48036.2020.9135581>
7. Carneiro de Souza, L., de Souza Lopes, C. H., dos Santos, R. C. C., Cerqueira Sodré Junior, A., & Mendes, L. L. (2022). A study on propagation models for 60 GHz signals in indoor environments. *Frontiers in Communications and Networks*, 2, 757842. <https://doi.org/10.3389/frcmn.2021.757842>
8. Koppel, T., Shishkin, A., Haldre, H., Toropovs, N., Vilcane, I., & Tint, P. (2017). Reflection and transmission properties of common construction materials at 2.4 GHz frequency. *Energy Procedia*, 113, 158–165. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.04.045>
9. García Sánchez, M., Iglesias, C., Cuiñas, I., & Expósito, I. (2022). Building penetration losses at 3.5 GHz: Dependence on polarization and incidence angle. *Electronics*, 12(1), 106. <https://doi.org/10.3390/electronics12010106>
10. Rappaport, T. S., MacCartney, G. R., Samimi, M. K., & Sun, S. (2015). Wideband millimeter wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design. *IEEE Communications Magazine*, 52(9), 116–122. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2015.7374064>
11. Al Samman, A. M., Rahman, T. A., Chebil, J., Mohamad, H., & Islam, M. R. (2019). Comparative study of indoor propagation model below and above 6 GHz. *Electronics*, 8(1), 44. <https://doi.org/10.3390/electronics8010044>
12. Bullmann, M., Fetzer, T., Ebner, F., Deinzer, F., & Grzegorzec, M. (2020). Comparison of 2.4 GHz WiFi FTM and RSSI-based indoor positioning methods in realistic scenarios. *Sensors*, 20(16), 4515. <https://doi.org/10.3390/s20164515>
13. Bellalta, B., & Kosek Szott, K. (2019). AP-initiated multi-user transmissions in IEEE 802.11ax WLANs. *Ad Hoc Networks*, 85, 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2018.10.021>
14. Fukuda, Y., et al. (2022). Characterizing the basic performance of IEEE 802.11ax WLANs in a campus environment. *Proceedings of the IEEE/IFIP NOMS*. <https://doi.org/10.1109/NOMS54207.2022.9789895>

15. Tutelian, S., Ferragut, J., Cerdà, L., & Barceló, J. (2021). IEEE 802.11ax OFDMA resource allocation with trigger-based uplink scheduling. *Sensors*, 21(18), 6099. <https://doi.org/10.3390/s21186099>
16. Oughton, E. J., & Frias, Z. (2021). Revisiting wireless internet connectivity: 5G vs Wi-Fi 6. *Telecommunications Policy*, 45(5), 102095. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2021.102095>
17. Kuhn, M. G. (2013). Compromising emanations of LCD TV sets. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 55(3), 564–570. <https://doi.org/10.1109/TEM.2013.2252353>
18. Antić, V., Dakić, O., Glišović, V., et al. (2024). Protecting data at risk of unintentional electromagnetic emanations. *Applied Sciences*, 14(11), 4830. <https://doi.org/10.3390/app14114830>
19. Gifuni, A., Migliaccio, M., Testa, O., et al. (2020). Latest developments on the shielding effectiveness measurement with reverberation chambers. *IET Science, Measurement & Technology*, 14(9), 828–838. <https://doi.org/10.1049/iet-smt.2019.0242>
20. Jakoby, B., Beigelbeck, R., & Voglhuber-Brunnmaier, T. (2023). Understanding the shielding efficiency of a Faraday grid cage: A spectral domain approach. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 65(2), 2–11. <https://doi.org/10.1109/MAP.2022.3229287>
21. Hamidi, A., Djafri, K., & Ait Si Ali, S. (2024). Stochastic approach to evaluate the shielding effectiveness of a composite material slab. *Electronics Letters*, 60(2), e70016. <https://doi.org/10.1049/ell2.70016>
22. Song, R., et al. (2024). Graphene assembled films for radio frequency and electromagnetic interference shielding. *Accounts of Materials Research*, 5(9), 2211–2224. <https://doi.org/10.1021/accountsmr.4c00023>
23. Ali, U., De Felice, M., Lissandrin, N., et al. (2022). Data-driven analysis of outdoor-to-indoor propagation for deployed 5G networks at 3.5 GHz. *Future Internet*, 14(8), 239. <https://doi.org/10.3390/fi14080239>
24. Al Khero, S. K., & Abbosh, Y. M. (2021). Path loss and channel modeling at 3.5 GHz for 5G cellular system. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1152, 012006. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1152/1/012006>
25. Horn, B. K. P. (2020). Doubling the accuracy of indoor positioning: Frequency diversity. *Sensors*, 20(5), 1489. <https://doi.org/10.3390/s20051489>
26. Yu, Y., Chen, R., Chen, L., Guo, G., Ye, F., & Liu, Z. (2019). A robust dead reckoning algorithm based on Wi-Fi FTM and multiple sensors. *Remote Sensing*, 11(5), 504. <https://doi.org/10.3390/rs11050504>
27. Banin, L., Bar Shalom, O., Dvorecki, N., & Amizur, Y. (2018). Scalable Wi-Fi client self-positioning using cooperative FTM sensors. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 68(10), 3686–3698. <https://doi.org/10.1109/TIM.2018.2880887>
28. Au, E. (2016). The latest progress on IEEE 802.11mc and IEEE 802.11ai. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 11(3), 19–21. <https://doi.org/10.1109/MVT.2016.2586398>

29. He, S., & Chan, S. H. G. (2016). Wi-Fi fingerprint-based indoor positioning: Recent advances and comparisons. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 18(1), 466–490. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2464084>
30. De Beelde, B., Peter, R., et al. (2022). Outdoor mmWave channel modeling for fixed wireless access at 60 GHz (with indoor coverage implications). *Radio Science*, 57(6), e2022RS007519. <https://doi.org/10.1029/2022RS007519>

Received 05.09.2025.  
Accepted 11.09.2025.

***Spatial modeling of information leakage risks in office networks:  
construction of a controlled zone***

*The relevance of this study is determined by the growing risks of confidential information leakage in office networks caused by electromagnetic emissions from technical devices. Modern office environments are heavily saturated with wireless services, including Wi-Fi, Bluetooth, LoRa, mobile terminals, and IoT devices, and even low-power signals extending beyond building boundaries can create technical channels for unauthorized interception. This situation highlights the need for scientifically justified models capable of predicting spatial vulnerability zones and supporting the design of protective measures. The core problem lies in the absence of universal methods for quantitative evaluation of spatial risks that would simultaneously account for diverse building materials, architectural layouts, and internal environmental conditions. Existing empirical approaches either lack accuracy or are excessively resource-intensive for practical integration into information security management systems. The purpose of the article is to develop a spatial-mathematical model for the identification and optimization of a “controlled zone” within office premises, in which the signal level is reliably reduced below the detection threshold of unauthorized receivers.*

*The methodology builds on a modified Hata model adapted for indoor environments by incorporating absorption coefficients of typical building materials such as concrete, brick, glass, and gypsum board, as well as the exponential attenuation law. The approach includes the construction of a binary coverage matrix to generate vulnerability maps and applies an optimization algorithm for sensor placement based on the maximum coverage criterion subject to budgetary constraints. The proposed method was validated through an experimental case study of a typical office. The results show that at a frequency of 96.1 MHz and transmission power of 2.3 mW, the attenuation boundary occurs at distances beyond 10 m, while the recommended controlled zone encompasses approximately  $24 \times 8.5$  m. The model ensures precise forecasting of radio leakage zones and supports optimization of the required number of sensors. The key findings demonstrate that combining the adapted Hata model with matrix-based coverage representation provides an effective means of identifying spatial information leakage risks. Furthermore, the results can be integrated into information security management systems in line with ISO/IEC 27005 standards and national regulations in the field of technical information protection.*

*The practical significance of the study lies in its applicability to governmental bodies, business centers, and critical infrastructure facilities where reliable planning of controlled zones is essential to minimize the probability of technical leakage channels and optimize monitoring costs.*

*Keywords: radio leakage, Hata model, controlled zone, office network, information security, electromagnetic emission, signal penetration, spatial modeling, secured premises.*

**Козлюк Ірина Олексіївна** – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікаційних систем державного некомерційного підприємства Державний університет «Київський авіаційний інститут», ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8239-8937>

**Прокопович-Ткаченко Дмитро Ігорович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій, Університет митної справи та фінансів Старший науковий співробітник Державної наукової установи «Інститут інформації, безпеки і права Національної академії правових наук України», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6590-3898>.

**Kozlyuk Iryna Oleksiivna** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Telecommunications Systems of the State Non-Profit Enterprise State University “Kyiv Aviation Institute”, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-8239-8937>.

**Prokopovych-Tkachenko Dmytro Igorovych** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Cybersecurity and Information Technologies, University of Customs and Finance Senior Researcher of the State Scientific Institution “Institute of Information, Security and Law of the National Academy of Legal Sciences of Ukraine”, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6590-3898>.

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДІВ КОНСТРУКТИВНО-ПРОДУКЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ДЕТЕРМІНОВАНИХ ЧАСОВИХ РЯДІВ

*Анотація.* Прогнозування часових рядів є одним із ключових завдань сучасного аналізу даних та моделювання складних систем. У даній роботі розглядається застосування конструктивно-продукційного підходу для роботи з детермінованими фрактальними часовими рядами. Мета роботи полягає у відновленні конструктивної моделі, яка відображає внутрішню структуру ряду та дозволяє здійснювати його продовження за визначеними правилами генерації. Для перевірки ефективності підходу було сформовано набір синтетичних рядів, породжених конструктивними моделями різного рівня складності. У свою чергу, відновлення моделей виконувалося за допомогою спеціалізованого програмного додатку. Прогнозна здатність методу перевірялася шляхом порівняльного аналізу з класичними моделями прогнозування, зокрема ARIMA, LSTM, ARIMA-LSTM та CNN-LSTM. Точність оцінювалася за метриками MAE та MAPE. Результати показали, що конструктивно-продукційне моделювання забезпечує найвищу точність прогнозування серед усіх протестованих моделей, що є очікуваним з огляду на природу вхідних рядів. Важливо підкреслити, що на відміну від традиційних методів, даний підхід надає можливість отримати не лише прогнозні значення, але й конструктивну модель часового ряду, придатну для подальшого структурного аналізу, виявлення закономірностей та дослідження властивостей. Таким чином, проведене дослідження підтверджує ефективність і доцільність використання конструктивно-продукційного моделювання для прогнозування детермінованих фрактальних часових рядів.

*Ключові слова:* програмна інженерія, конструктивно-продукційне моделювання інформаційних технологій, фрактали, фрактальні часові ряди, генетичний алгоритм, L-система.

**Вступ.** Існує велика кількість методів опису динаміки складних систем протягом визначеного проміжку часу. Найбільш класичним і поширеним підходом є побудова часових рядів, що відображають зміну загального стану системи або окремих її показників на основі результатів спостережень. Часові ряди слугують базою для проведення детального аналізу поведінки системи.

У наукових дослідженнях виділяють три основні завдання роботи з часовими рядами: аналіз, моделювання та прогнозування [1]. Пріоритетність кожного із завдань ви-

значається кінцевою метою дослідження, однак найбільшу увагу зазвичай приділяють прогнозуванню, яке дозволяє оцінити можливі майбутні стани системи.

У сучасній практиці методи прогнозування значно еволюціонували завдяки розвитку математичних підходів і впровадженню інформаційних технологій, що забезпечило автоматизацію обчислювальних процесів.

Класичні методи прогнозування поділяються на дві основні групи: лінійні та нелінійні [2]. Лінійні моделі базуються на припущенні, що залежності між значеннями ряду можна адекватно описати лінійною комбінацією. Вони відзначаються простотою реалізації, але обмежені у точності. Нелінійні моделі, своєю чергою, здатні відображати складні та нетривіальні взаємозв'язки між значеннями ряду, що забезпечує їх більшу універсальність і точність при моделюванні реальних систем.

Прикладом складної залежності в часових рядах є наявність фрактальних властивостей. Це проявляється у повторюваних паттернах, форма яких зберігається при розгляді на різних масштабах. Водночас попередні значення ряду можуть впливати на поточні у довільних часових інтервалах [3].

Для роботи з рядами такої природи, окрім класичних методів, застосовуються підходи конструктивно-продукційного моделювання [4]. Зокрема, розроблені методики генерації синтетичних детермінованих часових рядів, а також зворотні процедури відновлення даних для формування вхідних послідовностей. Слід зазначити, даний підхід дозволяє не лише оперувати лише загальними засобами та значеннями часового ряду, але також визначає конструктивні моделі, які описуються часові ряди [5]. Дана особливість виділяє підхід конструктивізму від класичних вищезазначених методів.

**Мета роботи.** Метою даної роботи є порівняння ефективності використання елементів конструктивно-продукційного моделювання для подовження фрактальних детермінованих часових рядів з іншими відомими моделями прогнозування (лінійними та нелінійними) з оцінкою ефективності, здійсненою за допомогою методів оцінки MAE та MAPE [6,7].

**Конструктивно-продукційне моделювання.** Основний принцип конструктивно-продукційного моделювання при роботі з детермінованими часовими рядами полягає у визначенні об'єктів композитного конструктора та його складових сутностей, які разом визначають загальну поведінку системи на основі узагальненого конструктора []. Цей підхід дозволяє формалізувати структуру часових рядів і забезпечує можливість їх аналізу та передбачення подальших значень на основі заданих правил генерації.

Для відновлення конструктивної моделі часового ряду були виділені три ключових конструктора, кожен з яких виконує специфічну функцію:

- $C_{MS}$  – формує фрактальну мультисимвольну послідовність відповідно по зазначених правил;
- $C_{TS}$  – перетворює вищезазначену символьну послідовність у фрактальний часовий ряд відповідно за визначених початкового значення та його перетворення;
- $C_{RS}$  – відновлює похідну модель наданого часового ряду.

Кожен з зазначених конструкторів відповідає за відповідну операцію в рамках композитного конструктора  $C_M$ , який у свою чергу має два визначених варіанти виконання: контроль якості перетворення часових рядів у конструктивну модель ( $MQ$ ) та екстраполяція часових рядів для прогнозування ( $MF$ ) [8].

Основною метою режиму  $MQ$  є визначення процесу верифікації роботи побудованого процесу за рахунок випробувань на синтетичних часових рядах, згенерованих за задалегідь визначеною конструктивною моделлю. Він включає наступні етапи:

- випадково генерує правило підстановки;
- послідовно ініціює виконання конструкторів  $C_{MS}$ ,  $C_{TS}$  та  $C_{RS}$ ;
- передає параметри та отримує згенеровані структури (правило підстановки, зрештою знайдене конструктором  $C_{RS}$ );
- порівнює дані, передані конструктору  $C_{MS}$ , та отримані від  $C_{RS}$  правила підстановки, та визначає різницю між результатами;
- неодноразово виконує попередні кроки.

Виконання в режимі  $MF$  описує загальний процес обробки наданого ряду з генерацією його конструктивної моделі та на її основі продовженням його значень на визначений проміжок. Порядок виконання включає наступні етапи:

- отримує часовий ряд;
- послідовно ініціює виконання конструкторів  $C_{RS}$ ,  $C_{MS}$  та  $C_{TS}$ ;
- отримує сформовані структури та часовий ряд з продовженням.

Ключовим елементом, що визначає ітеративну поведінку системи, є генетичний алгоритм. Відповідно до його класичної реалізації з урахуванням необхідних модифікацій відповідно до області використання, процес включає фази: генерації початкової популяції хромосом, кросовера та мутацію, оцінку життєздатності кожного представника та подальшу селекцію.

Структура хромосоми відповідає набору параметрів конструктивної моделі часового ряду, та включає наступні сутності:

$$X = \langle f, P, V_f, dV_f \rangle, \quad (1)$$

де  $f$  – аксіома L-системи,  $P$  – визначені правила заміщення,  $V_f$  – початкове значення часового ряду та  $dV_f$  – його приріст. Визначений алфавіт системи включає термінальні символи, кожному з яких відповідає операція інтерпретації (табл. 1) при перетворенні фінального мультисимвольного рядка у часовий ряд (рис. 1).

На етапі селекції з кожної хромосоми формується часовий ряд, який порівнюється з вхідним за допомогою МНК. Отримане значення виступає у ролі фітнес-функції, оцінюючи точність відповідності моделі та визначаючи її життєздатність у популяції [8].

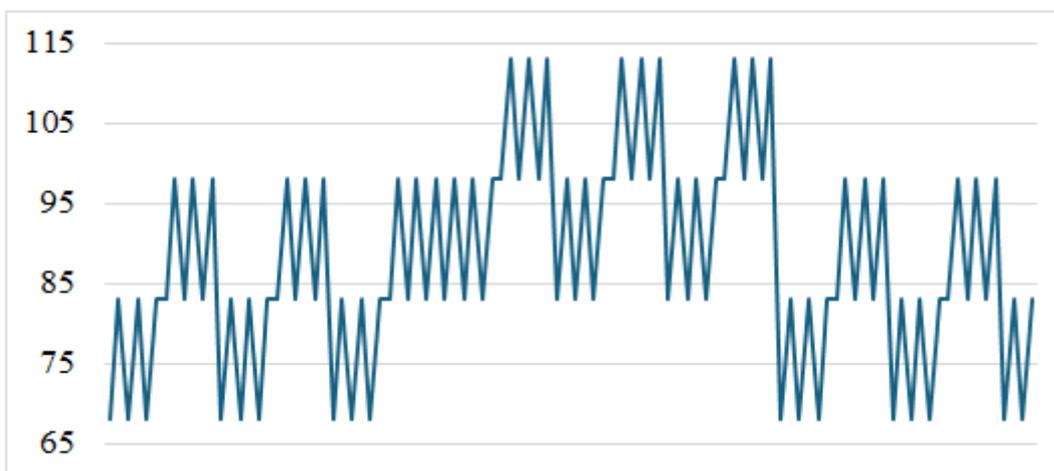


Рисунок 1 – Ряд заданий моделлю з параметрами  
 $\{P: f \rightarrow f + f + f - f-; V_f = 68, dV_f = 15\}$

Таблиця 1

Опис набору терміналів та їх відповідних операції

Термінальний символ	Відповідна операція
$f$	Додає нову точку до часового ряду, значення якої дорівнює поточному значенню $V_f$
+	Збільшує поточне значення параметру $V_f$ відповідно до значення $dV_f$ .
-	Зменшує поточне значення параметру $V_f$ відповідно до значення $dV_f$ .

**Фрактальність рядів породжених конструктивною моделлю.** Аналіз властивостей рядів, породжених конструктивною моделлю, свідчить про їх фрактальну природу. Це підтверджується на основі загальновідомих показників, зокрема через дві ключові характеристики: самоподібність та фрактальну розмірність, що оцінюється за допомогою показника Херста [9].

Самоподібність у даному випадку може бути наочно продемонстрована шляхом ітеративної розгортки породжуючої L-системи [10] конструктивної моделі. У процесі послідовної заміни терміналів відповідними правими частинами правил заміщення відтворюється глобальний патерн, що повторює себе на різних масштабах і визначає самоподібну структуру часового ряду (рис. 2).

Додаткове підтвердження фрактальності було отримано на основі розрахунку показника Херста. Для часових рядів, породжених конструктивною моделлю, значення

цього показника стабільно перевищують 0,8. Це свідчить про персистентність та виражену тенденцію до продовження поточного руху значень ряду та означає, що поведінка системи в майбутньому суттєво залежить від її попередніх станів.

У свою чергу, розрахована фрактальна розмірність Гаусдорфа [11] для таких рядів становить близько  $D \approx 1.2$ . Дане значення підтверджує їх фрактальну природу та узгоджується з виявленою властивістю самоподібності.

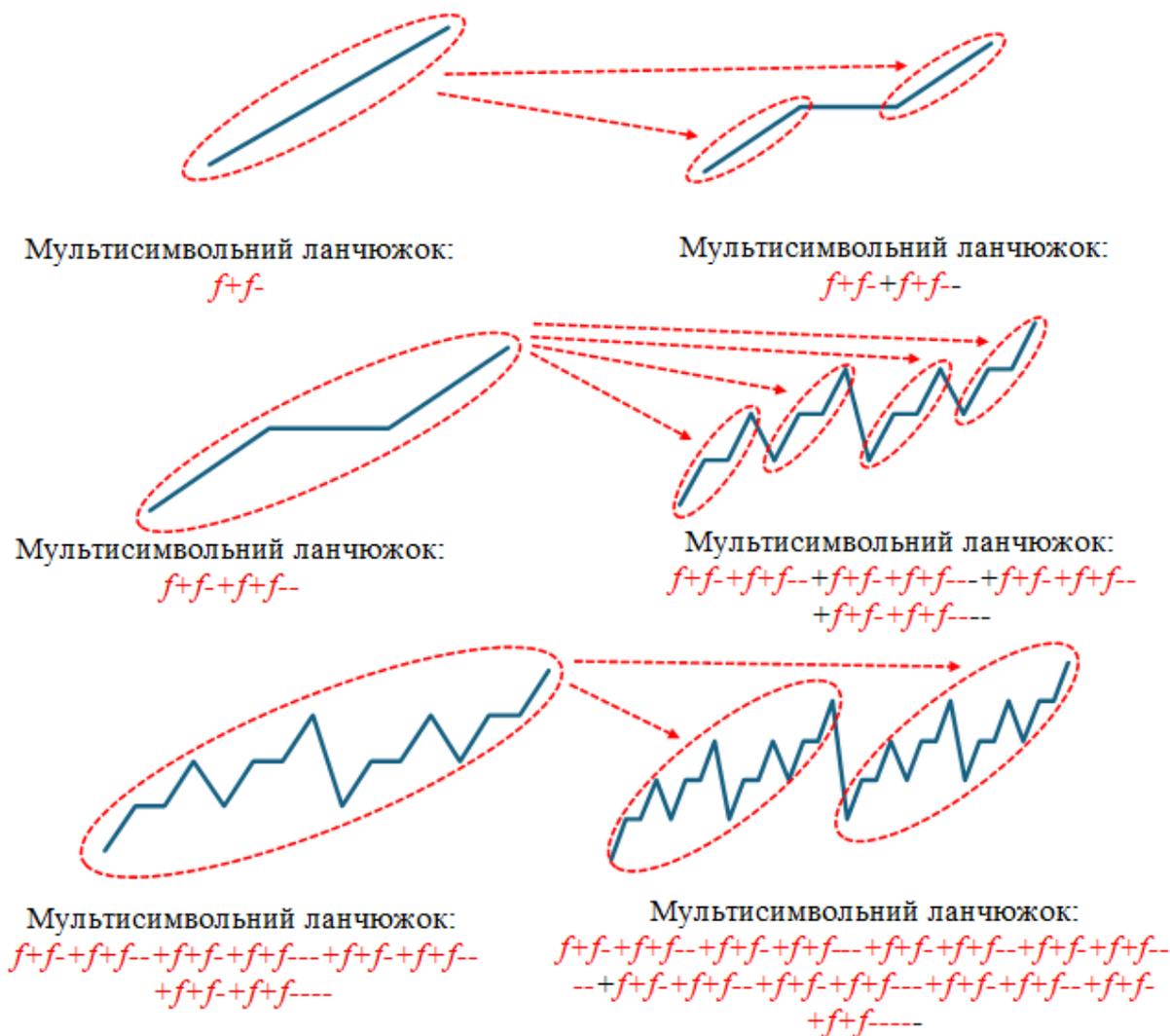


Рисунок 2 – Покрокова розгортка ряду заданого моделлю з параметрами

$$\{f, P: f \rightarrow f + f-; V_f = 15, dV_f = 10\}$$

**Обрані моделі для порівняння ефективності.** У протипагу до підходу конструктивізму, для оцінки ефективності операції передбачення подальших значень ряду були обрані загальновідомі лінійні та нелінійні моделі. Одними з найпопулярніших лінійних моделей прогнозування часових рядів є моделі типу ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) [12]. Вона являє собою узагальненням моделі авторегресійної ковзної середньої (ARMA) й стала класичним підходом для роботи з часовими рядами.

Загальне позначення описується як  $ARIMA(p, d, q)$ , де параметр  $p$  визначає порядок (кількість часових затримок) компоненту авторегресії, параметр  $d$  – кількість ра-

зів, коли з даних віднімали попередні значення (порядок диференціювання), а параметр  $q$  – порядок моделі ковзного середнього.

Найчастіше ARIMA використовується з часовими рядами обмеженої довжини [13], які не мають чіткої сезонності значень [14] та мають явну тенденцію. Також дана модель може виступати як один з компонентів більш складного підходу, як ARIMA-LSTM, де використовується для визначення трендів та кореляції [15].

Основними недоліками зазначеної моделі полягає сама у вузькості області використання. У протизагу цьому вона пропагує низьку складність та ефективність у застосуванні з відповідними наборами даних.

Для прогнозування рядів які мають складніші зв'язки між своїми значеннями на поточний момент досить широко застосовують засоби машинного навчання. Найбільш популярним є використання рекурентних нейронних мереж [16]. Найпопулярнішими серед них визначають LSTM моделі [17].

Їх суть полягає у наявності каналу довготривалої пам'яті, керування яким визначається трьома основними затворами:

- вхідний затвор, який визначає набір даних поточного кроку, який буде записаний у канал пам'яті;
- затвор забування, який визначає частину збережених даних яку потрібно видалити;
- вихідний затвор, який контролює селекцію даних з каналу пам'яті, які необхідно передати на вихід.

За допомогою зазначених компонентів модель крок за кроком зчитує значення часового ряду, формуючи стан у каналі пам'яті. Протягом цього процесу зберігаються коротко строкові та довго строкові зв'язки на основі чого зберігається загальний тренд разом з окремими коливаннями значень часового ряду.

Сфера використання моделей типу LSTM досить широка. Її класична реалізація найчастіше використовується при прогнозуванні фінансових часових рядів, таких як індекси фондових бірж [18] та інших часових рядів зі складними та довготривалими залежностями [19]

Окрім класичного підходу до реалізації даної моделі, існує велика кількість її варіацій, які включають к себе додаткові шари нейронної мережі разом із статистичними моделями, такі як CNN-LSTM [20] та вже зазначена ARIMA-LSTM.

Особливістю першої є наявність додаткового шару згорткової мережі (CNN). Завдяки ньому, модель обробляє локальні патерни, які у випадку часових рядів, являють собою аномальні стани системи. На їх основі формується відповідний набір даних, відображаючи ознаки часового ряду. На основі нього, вже LSTM-модель формує вихідний набір даних, виходячи з визначення довготривалих зв'язків між ознаками часового ряду.

Основною перевагою даної моделі є її можливість працювати з наборами даних, які мають велику шумність значень. Завдяки цьому вона має більш широку область використання, починаючи з вже зазначеного прогнозування показників фондових

бірж [21], та продовжуючи транспортним трафіком [22] та показниками навколишнього середовища [23].

У свою чергу, модель ARIMA-LSTM працює за принципом, подібним до CNN-LSTM. На першому етапі, ARIMA будує лінійний прогноз можливих значень часового ряду. На основі цих даних формується набір залишків, який формується на основі різниці реального значення та лінійного прогнозу.

На наступному етапі, LSTM-частина будує свій прогноз на основі саме залишкових значень. Результуючий прогноз формується як сума двох отриманих наборів двох компонентів моделі. Це дозволяє отримати точніший прогноз за рахунок охоплення лінійних показників та обробку можливих шумів.

Дана модель показала ефективність прогнозування цінних показників з явним проявом сезонності [24] та показників захворюваності інфекційними захворюваннями [25].

**Опис експериментальної частини.** Для підтвердження сформованої теорії та отримання статистично значущих результатів було сформовано початковий набір експериментальних синтетичних детермінованих часових рядів, що генеруються конструктивними моделями різного рівня складності. На поточному етапі дослідження складність структури конструктивної моделі визначається за довжиною правої частини правила заміщення породжуючої L-системи. Поряд із цим, кількість правил заміщення встановлюється рівною одному. Ця умова обумовлена методом генерації кінцевої послідовності символів.

Загалом було визначень 15 конструктивних моделей відповідної структури. На основі кожної з них, був побудований часовий ряд довжиною в 500 точок.

На основі кожного сформованого часового ряду було проведено процес відновлення конструктивної моделі із застосуванням спеціалізованого автоматизованого програмного додатку [26]. На цьому етапі випробувань для побудови моделі використовувалися лише перші 400 точок ряду, що розглядалися як навчальна вибірка. Решта 100 точок відкладалася для подальшої верифікації прогнозної здатності моделі. Перевірка здійснювалася шляхом оцінки відповідності прогнозованих значень фактичним даним із використанням обраних метрик точності, що дозволяло кількісно оцінити рівень наближення моделі до реальних результатів.

Відповідно до поставленої мети дослідження, були проведені паралельні випробування з використанням зазначених класичних підходів прогнозування. Для забезпечення коректності порівняння експерименти здійснювалися за однаковою методикою:

- перші 400 точок часового ряду використовувалися для навчання моделей;
- останні 100 точок застосовувалися для побудови прогнозу та подальшої оцінки точності, що дозволяло визначити близькість результатів до еталонних значень.

Такий підхід забезпечує можливість безпосереднього порівняння ефективності конструктивно-продукційного моделювання із традиційними методами прогнозування та дозволяє зробити обґрунтовані висновки щодо переваг або обмежень кожного з підходів.

**Результати проведених випробувань.** Після завершення першого етапу випробувань для всіх вхідних часових рядів було успішно відновлено породжуючі конструктивні моделі (табл. 2). Це свідчить про коректність застосованої методики реконструкції та її здатність відтворювати внутрішню структуру рядів різної складності.

На другому етапі експериментів було проведено прогнозування подальших значень часових рядів із використанням усіх обраних методів (табл. 3).

Таблиця 2

Порівняння наданих та відновлених параметрів рядів

Параметри модельного ряду	Параметри відновленого ряду
$P: f \rightarrow +ff - ff$ $V_f = 54, dV_f = 43$	$P: f \rightarrow ff - ff + ff$ $V_f = 24.95, dV_f = 34.96$
$P: f \rightarrow +ff - ff + f -$ $V_f = 42, dV_f = 31$	$P: f \rightarrow ++ff --ff + +f --$ $V_f = 42.9, dV_f = 15.49$
$P: f \rightarrow +f - f + f -$ $V_f = 78, dV_f = 29$	$P: f \rightarrow +f - f + f -$ $V_f = 75.81, dV_f = 28.98$
$P: f \rightarrow ff - f + +ff -$ $V_f = 24, dV_f = 15$	$P: f \rightarrow ff - f + +ff -$ $V_f = 23.97, dV_f = 14.56$
$P: f \rightarrow f + f + f - f -$ $V_f = 36, dV_f = 45$	$P: f \rightarrow f + f + f - f -$ $V_f = 36.69, dV_f = 44.79$

Таблиця 3

Порівняння точності передбачення подальших значень ряду

№	Метрика	КПМ	ARIMA	LSTM	ARIMA-LSTM	CNN-LSTM
1	MAE	0.24	29.9	2.33	15.3122	5.2323
	MAPE	0.14%	22.08%	1.49%	9.71%	3.30%
2	MAE	0.87	49.6	1.77	17.112	2.6026
	MAPE	1.02%	67.34%	2.32%	15.44%	3.37%
3	MAE	2.27	31.18	3.61	12.4109	4.0443
	MAPE	1.23%	15.57%	1.86%	5.39%	2.28%
4	MAE	0.82	22.49	2.91	9.677	5.9627
	MAPE	1.72%	51.71%	6.02%	15.46%	15.77%
5	MAE	0.5	69.87	8.77	19.3636	9.0058
	MAPE	0.16%	22.98%	3.73%	6.57%	3.94%

Аналіз значень метрик свідчить, що прогнозування на основі конструктивно-продукційних моделей забезпечує найвищу точність при роботі з синтетичними детермінованими часовими рядами.

Разом із тим, результати також демонструють, що нелінійні методи прогнозування (наприклад, нейронні мережі чи інші алгоритми машинного навчання) здатні забезпечувати досить високий рівень точності відтворення часових рядів. Це свідчить про їхню адаптивність та здатність якісно відображати складні внутрішні залежності між значеннями.

Найгірші результати були отримані у випадку застосування ARIMA-моделі, за винятком тих ситуацій, коли вхідний часовий ряд наближався до майже повністю лінійного. Такий результат є закономірним, оскільки область застосування лінійних моделей обмежена рядами з простою структурою та слабко вираженими нелінійними залежностями. У випадку складних фрактальних систем можливості ARIMA є недостатніми для відтворення їх динаміки.

**Висновки.** У даній роботі було проведено дослідження застосування конструктивно-продукційного підходу для роботи з детермінованими фрактальними часовими рядами з метою прогнозування їх подальших значень. Основна ідея полягала у використанні відновленої конструктивної моделі, що відображає внутрішню структуру часового ряду та дозволяє здійснювати його продовження за рахунок визначених правил генерації.

Експериментальні випробування виконувалися на основі спеціально сформованого набору синтетичних детермінованих часових рядів, породжених конструктивними моделями різного рівня складності. Для перевірки ефективності запропонованого підходу було проведено порівняльний аналіз з результатами роботи відомих класичних та сучасних моделей прогнозування часових рядів, зокрема: ARIMA, LSTM, ARIMA-LSTM та CNN-LSTM.

Відповідно до отриманих результатів, конструктивно-продукційне моделювання продемонструвало високу ефективність при прогнозуванні подальших значень часових рядів. Для кожного з розглянутих випадків точність прогнозування за метриками MAE та MAPE перевищувала результати, отримані іншими обраними моделями. Такий результат є очікуваним з огляду на специфіку постановки задачі та природу вхідних рядів, які мають фрактальну детерміновану структуру, що добре відтворюється конструктивними моделями.

Важливо підкреслити, що на відміну від класичних методів, конструктивно-продукційний підхід забезпечує не лише можливість прямого прогнозування, а й формує конструктивну модель часового ряду, яка може бути використана для подальшого структурного аналізу, виявлення закономірностей та формальних властивостей ряду. Це відкриває додаткові можливості для дослідження внутрішньої організації часових процесів.

Перспективи подальших досліджень у цій галузі пов'язані з генералізацією підходу та його розширенням на більш складні типи часових рядів. Зокрема, подальша робота може бути спрямована на адаптацію методу для роботи зі стохастичними часовими рядами та дослідження рядів, породжених L-системами з кількома правилами заміщення, що забезпечить відтворення більш складних структурних закономірностей;

Таким чином, результати дослідження підтверджують доцільність використання конструктивно-продукційного моделювання для роботи з детермінованими фрактальними часовими рядами та окреслюють напрями його подальшого розвитку.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Weigend A. Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past. London, 2018. URL: <https://doi.org/10.4324/9780429492648>.
2. Park M.-J., Yang H.-S. Comparative Study of Time Series Analysis Algorithms Suitable for Short-Term Forecasting in Implementing Demand Response Based on AMI. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 22. P. 7205. URL: <https://doi.org/10.3390/s24227205>.
3. Shu Z., Chan P.W. Application of fractal analysis on wind speed time series: A review. *Advances in Wind Engineering*, 2025, vol. 2, no. 1, p. 100028. ISSN 2950-6018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.awe.2024.100028>.
4. Skalozub V., Ilman V., Bilyy B. Constructive multiplayer models for ordering a set of sequences, taking into account the complexity operations of formations. *Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport*, 2020, pp. 61–76. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2020/213232>.
5. Shynkarenko K., Lytvynenko R., Chyhir I., Nikitina I. Modeling of lightning flashes in thunderstorm front by constructive production of fractal time series. In: *Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1080, Springer, 2020, pp. 173–185. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_13).
6. Foroutan P., Lahmiri S. Deep learning systems for forecasting the prices of crude oil and precious metals. *Financial Innovation*, 2024, vol. 10, p. 111. URL: <https://doi.org/10.1186/s40854-024-00637-z>.
7. Khan A.M., Osinska M. Comparing forecasting accuracy of selected grey and time series models based on energy consumption in Brazil and India. *Expert Systems with Applications*, 2023, vol. 212, p. 118840. ISSN 0957-4174. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118840>.
8. Shynkarenko V., Zhadan A. Modeling of the deterministic fractal time series by one rule constructors. 2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Zbarazh, Ukraine, 2020, pp. 336–339. URL: <https://doi.org/10.1109/CSIT49958.2020.9321923>.
9. Serletis A., Rosenberg A.A. The Hurst exponent in energy futures prices. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2007, vol. 380, pp. 325–332.
10. Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. *The algorithmic beauty of plants*. Springer Science & Business Media, 2012.
11. Tsukamoto M. Mean Hausdorff dimension of some infinite-dimensional fractals. *Journal d'Analyse Mathématique*, 2025, vol. 155, pp. 235–286. URL: <https://doi.org/10.1007/s11854-024-0353-0>.
12. Ospina R., Gondim J.A.M., Leiva V., Castro C. An overview of forecast analysis with ARIMA models during the COVID-19 pandemic: Methodology and case study in Brazil. *Mathematics*, 2023, vol. 11, p. 3069. URL: <https://doi.org/10.3390/math11143069>.

13. Tarmanini C., Sarma N., Gezegin C., Ozgonenel O. Short term load forecasting based on ARIMA and ANN approaches. *Energy Reports*, 2023, vol. 9, suppl. 3, pp. 550–557. ISSN 2352-4847. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.060>.
14. Bhalla V., Bhalla A., Jain R. A comparison of ARIMA, SARIMA, and statistical models for estimating. In: *Sustainable Computing and Intelligent Systems: Proceedings of SCIS 2024*, vol. 2, 1296, 2025, p. 185.
15. Ray S., Lama A., Mishra P., Biswas T., Das S.S., Gurung B. An ARIMA-LSTM model for predicting volatile agricultural price series with random forest technique. *Applied Soft Computing*, 2023, vol. 149, part A, p. 110939. ISSN 1568-4946. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110939>.
16. Salem F.M. Recurrent Neural Networks (RNN). In: *Recurrent Neural Networks*. Cham: Springer, 2022. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89929-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89929-5_3).
17. Al-Selwi S.M., Hassan M.F., Abdulkadir S.J., Muneer A., Sumiea E.H., Alqushaibi A., Ragab M.G. RNN-LSTM: From applications to modeling techniques and beyond—Systematic review. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 2024, vol. 36, no. 5, p. 102068. ISSN 1319-1578. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.102068>.
18. Md A.Q., Kapoor S., Junni A.V.C., Sivaraman A.K., Tee K.F., Sabireen H., Janakiraman N. Novel optimization approach for stock price forecasting using multi-layered sequential LSTM. *Applied Soft Computing*, 2023, vol. 134, p. 109830. ISSN 1568-4946. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109830>.
19. Wang K., Zhang J., Li X., Zhang Y. Long-term power load forecasting using LSTM-Informer with ensemble learning. *Electronics*, 2023, vol. 12, p. 2175. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics12102175>.
20. Elmaz F., Eyckerman R., Casteels W., Latré S., Hellinckx P. CNN-LSTM architecture for predictive indoor temperature modeling. *Building and Environment*, 2021, vol. 206, p. 108327. ISSN 0360-1323. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108327>.
21. Wu J.M.T., Li Z., Herencsar N., et al. A graph-based CNN-LSTM stock price prediction algorithm with leading indicators. *Multimedia Systems*, 2023, vol. 29, pp. 1751–1770. URL: <https://doi.org/10.1007/s00530-021-00758-w>
22. Wang J.-D., Susanto C.O.N. Traffic flow prediction with heterogenous data using a hybrid CNN-LSTM model. *Computers, Materials and Continua*, 2023, vol. 76, no. 3, pp. 3097–3112. ISSN 1546-2218. URL: <https://doi.org/10.32604/cmc.2023.040914>.
23. Zha W., Liu Y., Wan Y., Luo R., Li D., Yang S., Xu Y. Forecasting monthly gas field production based on the CNN-LSTM model. *Energy*, 2022, vol. 260, p. 124889. ISSN 0360-5442. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124889>.
24. Ray S., Lama A., Mishra P., Biswas T., Das S.S., Gurung B. An ARIMA-LSTM model for predicting volatile agricultural price series with random forest technique. *Applied Soft Computing*, 2023, vol. 149, part A, p. 110939. ISSN 1568-4946. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110939>.
25. Jin Y.-C., Cao Q., Wang K.-N., Zhou Y., Cao Y.-P., Wang X.-Y. Prediction of COVID-19 data using improved ARIMA-LSTM hybrid forecast models. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 67956–67967. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3291999>.

26. Shynkarenko V., Zhadan A. Multiservice architecture of software for stochastic fractal time series forecasting. 2024 IEEE Conference on Computer Sciences and Information Technologies, 2024, pp. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/CSIT65290.2024.10982626>.

#### REFERENCES

1. Weigend A. Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past. London, 2018. URL: <https://doi.org/10.4324/9780429492648>.
2. Park M.-J., Yang H.-S. Comparative Study of Time Series Analysis Algorithms Suitable for Short-Term Forecasting in Implementing Demand Response Based on AMI. Sensors. 2024. Vol. 24, No. 22. P. 7205. URL: <https://doi.org/10.3390/s24227205>.
3. Shu Z., Chan P.W. Application of fractal analysis on wind speed time series: A review. Advances in Wind Engineering, 2025, vol. 2, no. 1, p. 100028. ISSN 2950-6018. URL: <https://doi.org/10.1016/j.awe.2024.100028>.
4. Skalozub V., Ilman V., Bilyy B. Constructive multiplayer models for ordering a set of sequences, taking into account the complexity operations of formations. Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport, 2020, pp. 61–76. URL: <https://doi.org/10.15802/stp2020/213232>.
5. Shynkarenko K., Lytvynenko R., Chyhir I., Nikitina I. Modeling of lightning flashes in thunderstorm front by constructive production of fractal time series. In: Advances in Intelligent Systems and Computing, vol. 1080, Springer, 2020, pp. 173–185. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-33695-0_13).
6. Foroutan P., Lahmiri S. Deep learning systems for forecasting the prices of crude oil and precious metals. Financial Innovation, 2024, vol. 10, p. 111. URL: <https://doi.org/10.1186/s40854-024-00637-z>.
7. Khan A.M., Osinska M. Comparing forecasting accuracy of selected grey and time series models based on energy consumption in Brazil and India. Expert Systems with Applications, 2023, vol. 212, p. 118840. ISSN 0957-4174. URL: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118840>.
8. Shynkarenko V., Zhadan A. Modeling of the deterministic fractal time series by one rule constructors. 2020 IEEE 15th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT), Zbarazh, Ukraine, 2020, pp. 336–339. URL: <https://doi.org/10.1109/CSIT49958.2020.9321923>.
9. Serletis A., Rosenberg A.A. The Hurst exponent in energy futures prices. Physica A: Statistical Mechanics and its Applications, 2007, vol. 380, pp. 325–332.
10. Prusinkiewicz P., Lindenmayer A. The algorithmic beauty of plants. Springer Science & Business Media, 2012.
11. Tsukamoto M. Mean Hausdorff dimension of some infinite-dimensional fractals. Journal d'Analyse Mathématique, 2025, vol. 155, pp. 235–286. URL: <https://doi.org/10.1007/s11854-024-0353-0>.
12. Ospina R., Gondim J.A.M., Leiva V., Castro C. An overview of forecast analysis with ARIMA models during the COVID-19 pandemic: Methodology and case study in Brazil. Mathematics, 2023, vol. 11, p. 3069. URL: <https://doi.org/10.3390/math11143069>.

13. Tarmanini C., Sarma N., Gezegin C., Ozgonenel O. Short term load forecasting based on ARIMA and ANN approaches. *Energy Reports*, 2023, vol. 9, suppl. 3, pp. 550–557. ISSN 2352-4847. URL: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.060>.
14. Bhalla V., Bhalla A., Jain R. A comparison of ARIMA, SARIMA, and statistical models for estimating. In: *Sustainable Computing and Intelligent Systems: Proceedings of SCIS 2024*, vol. 2, 1296, 2025, p. 185.
15. Ray S., Lama A., Mishra P., Biswas T., Das S.S., Gurung B. An ARIMA-LSTM model for predicting volatile agricultural price series with random forest technique. *Applied Soft Computing*, 2023, vol. 149, part A, p. 110939. ISSN 1568-4946. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110939>.
16. Salem F.M. Recurrent Neural Networks (RNN). In: *Recurrent Neural Networks*. Cham: Springer, 2022. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-89929-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-89929-5_3).
17. Al-Selwi S.M., Hassan M.F., Abdulkadir S.J., Muneer A., Sumiea E.H., Alqushaibi A., Ragab M.G. RNN-LSTM: From applications to modeling techniques and beyond—Systematic review. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 2024, vol. 36, no. 5, p. 102068. ISSN 1319-1578. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2024.102068>.
18. Md A.Q., Kapoor S., Junni A.V.C., Sivaraman A.K., Tee K.F., Sabireen H., Janakiraman N. Novel optimization approach for stock price forecasting using multi-layered sequential LSTM. *Applied Soft Computing*, 2023, vol. 134, p. 109830. ISSN 1568-4946. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109830>.
19. Wang K., Zhang J., Li X., Zhang Y. Long-term power load forecasting using LSTM-Informer with ensemble learning. *Electronics*, 2023, vol. 12, p. 2175. URL: <https://doi.org/10.3390/electronics12102175>.
20. Elmaz F., Eyckerman R., Casteels W., Latré S., Hellinckx P. CNN-LSTM architecture for predictive indoor temperature modeling. *Building and Environment*, 2021, vol. 206, p. 108327. ISSN 0360-1323. URL: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108327>.
21. Wu J.M.T., Li Z., Herencsar N., et al. A graph-based CNN-LSTM stock price prediction algorithm with leading indicators. *Multimedia Systems*, 2023, vol. 29, pp. 1751–1770. URL: <https://doi.org/10.1007/s00530-021-00758-w>
22. Wang J.-D., Susanto C.O.N. Traffic flow prediction with heterogenous data using a hybrid CNN-LSTM model. *Computers, Materials and Continua*, 2023, vol. 76, no. 3, pp. 3097–3112. ISSN 1546-2218. URL: <https://doi.org/10.32604/cmc.2023.040914>.
23. Zha W., Liu Y., Wan Y., Luo R., Li D., Yang S., Xu Y. Forecasting monthly gas field production based on the CNN-LSTM model. *Energy*, 2022, vol. 260, p. 124889. ISSN 0360-5442. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124889>.
24. Ray S., Lama A., Mishra P., Biswas T., Das S.S., Gurung B. An ARIMA-LSTM model for predicting volatile agricultural price series with random forest technique. *Applied Soft Computing*, 2023, vol. 149, part A, p. 110939. ISSN 1568-4946. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2023.110939>.
25. Jin Y.-C., Cao Q., Wang K.-N., Zhou Y., Cao Y.-P., Wang X.-Y. Prediction of COVID-19 data using improved ARIMA-LSTM hybrid forecast models. *IEEE Access*, 2023, vol. 11, pp. 67956–67967. URL: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3291999>.

Shynkarenko V., Zhadan A. Multiservice architecture of software for stochastic fractal time series forecasting. 2024 IEEE Conference on Computer Sciences and Information Technologies, 2024, pp. 1–4. URL: <https://doi.org/10.1109/CSIT65290.2024.10982626>.

Received 12.09.2025.  
Accepted 15.09.2025.

***Use of constructive-production modeling methods  
for forecasting deterministic time series***

*Time series forecasting is one of the key tasks of modern data analysis and complex systems modeling. This paper considers the application of a constructive-production approach to deterministic fractal time series. The aim of the study is to reconstruct a constructive model that reflects the internal structure of the series and allows its continuation according to defined generation rules. To verify the effectiveness of the approach, a set of synthetic series generated by constructive models of varying levels of complexity was formed. In turn, the reconstruction of the models was carried out using a specialized software application. The forecasting capability of the method was tested by comparative analysis with classical forecasting models, in particular ARIMA, LSTM, ARIMA-LSTM, and CNN-LSTM. Accuracy was evaluated using MAE and MAPE metrics. The results showed that constructive-production modeling provides the highest forecasting accuracy among all tested models, which is expected given the nature of the input series. It is important to emphasize that, unlike traditional methods, this approach makes it possible to obtain not only forecast values, but also a constructive model of the time series, which can be used for further structural analysis, identification of patterns, and study of properties. Thus, the study confirms the efficiency and feasibility of using constructive-production modeling for forecasting deterministic fractal time series.*

*Keywords: software, information technologies, constructive-production modeling, fractals, fractal time series, genetic algorithm, L-system.*

**Жадан Артем Анатолійович** – аспірант кафедри комп'ютерних інформаційних технологій, Український державний університет науки і технологій, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1133-1630>

**Шинкаренко Віктор Іванович** – професор кафедри комп'ютерних інформаційних технологій, д.т.н., Український державний університет науки і технологій, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8738-7225>

**Artem Zhadan** – PhD student of Department of Computer Information Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-1133-1630>

**Viktor Shynkarenko** – Professor of Department of Computer Information Technologies, Doctor of Technical Sciences, Ukrainian State University of Science and Technology, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8738-7225>

М.Г. Маліч, Г.Л. Щербаков, Д.В. Лайков, В.О. Герасимчук

## **ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ПАРАМЕТРІВ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ КОМБІНОВАНИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ**

*Анотація. Розробка концепції розподіленої енергогенерації в умовах техногенних катастроф є актуальною проблемою. Метою статті є обґрунтування нової структури та особливостей функціонування інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) параметрів технологічного процесу комбінованих енергосистем, яка побудована з використанням математичних методів аналізу технологічних процесів на принципах сучасної елементної бази та комп'ютерних технологій. Застосування ІВС дозволяє реалізувати моніторинг протікання технологічного процесу функціонування комбінованої енергосистеми, підвищити надійність функціонування технологічного обладнання та суттєво підвищити ефективність роботи. Ключові слова: Інтелектуальна інформаційно-вимірювальна система, комбінована енергосистема, база знань, фреми, параметри технологічного процесу, ефективність.*

В сучасній економічній моделі розвитку країни концепція розподіленої енергогенерації постійно набуває актуальності, а в окремих випадках (техногенні катастрофи, війна) – є необхідною і, практично, єдиною при вирішенні проблем локального забезпечення промисловості та населення тепловою та електричною енергіями.

Особливо активно розвивається напрям створення таких комбінованих енергосистем на основі екофільних інноваційних технологій, які дозволяють в якості енергоносіїв використовувати місцеву сировину, зокрема, побутового сміття, промислових відходів та спеціальних зелених насаджень [1-4].

Цей напрям базується на комбінації найбільш ефективних галузевих технологій, зокрема, сольволізу, анаеробного зброджування біомаси, високотемпературного піролізу та інших.

Для забезпечення оптимальних режимів функціонування таких комбінованих енергосистем необхідно мати достовірну інформацію про поточний стан всіх технологічних процедур функціонування енергосистеми.

Саме з цією метою автори пропонують застосовувати інтелектуальну інформаційно-вимірювальну систему (ІВС), структура якої представлена на рис. 1.

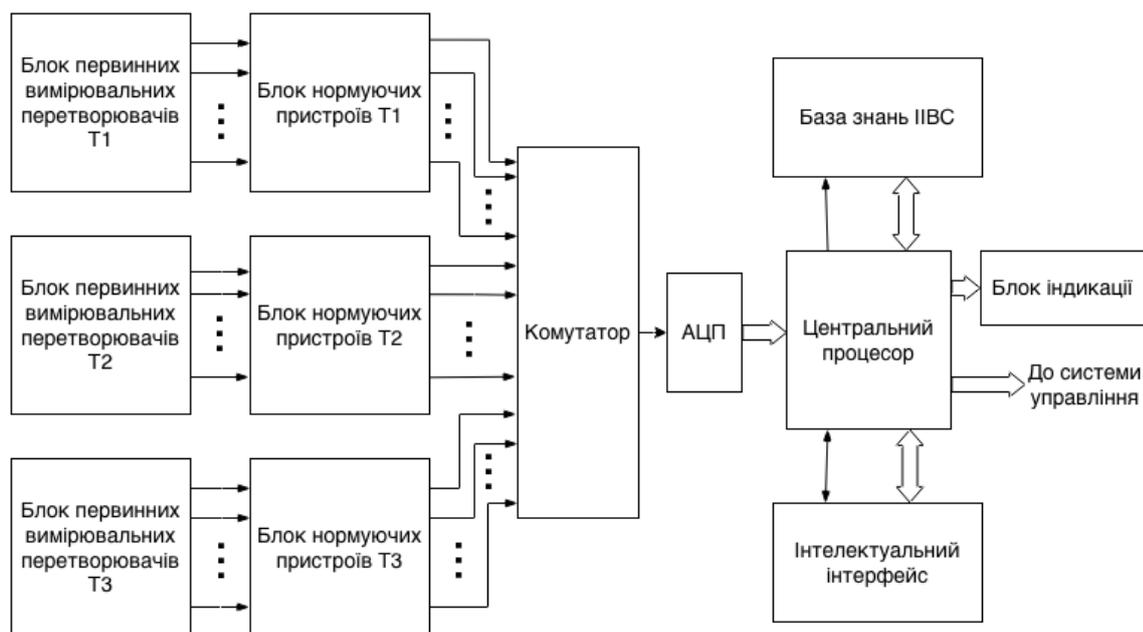


Рисунок 1 - Структура інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи

ІІВС складається із сукупності різноманітних первинних вимірювальних перетворювачів (датчиків) фізичних вимірюваних величин в інші фізичні величини (наприклад, напругу постійного струму) зручні для квантування [5].

Вихідні сигнали датчиків нормуються в блоках нормуючих пристроїв та через комутатор поступають на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП), з виходу якого отриманий цифровий код (тобто цифрове значення вимірюваного параметра технологічного процесу) поступає на вхід центрального процесора, в пам'яті якого формується спеціальний фрейм, в слотах якого записуються результати вимірювання всіх параметрів технологічного процесу в поточний момент часу. Цей фрейм називається фрейм-відгук.

ІІВС функціонує у відповідності з алгоритмом, представленим на рис. 2, а саме, вимірювальна система по чергово опитує всі датчики першого такту роботи комбінованої енергосистеми (тобто такту реалізації технології сольволізу) і розміщує їх у слотах фрейму-відгуку даного такту. Потім аналогічно вимірювальна система опитує датчики другого та третього тактів роботи комбінованої енергосистеми.

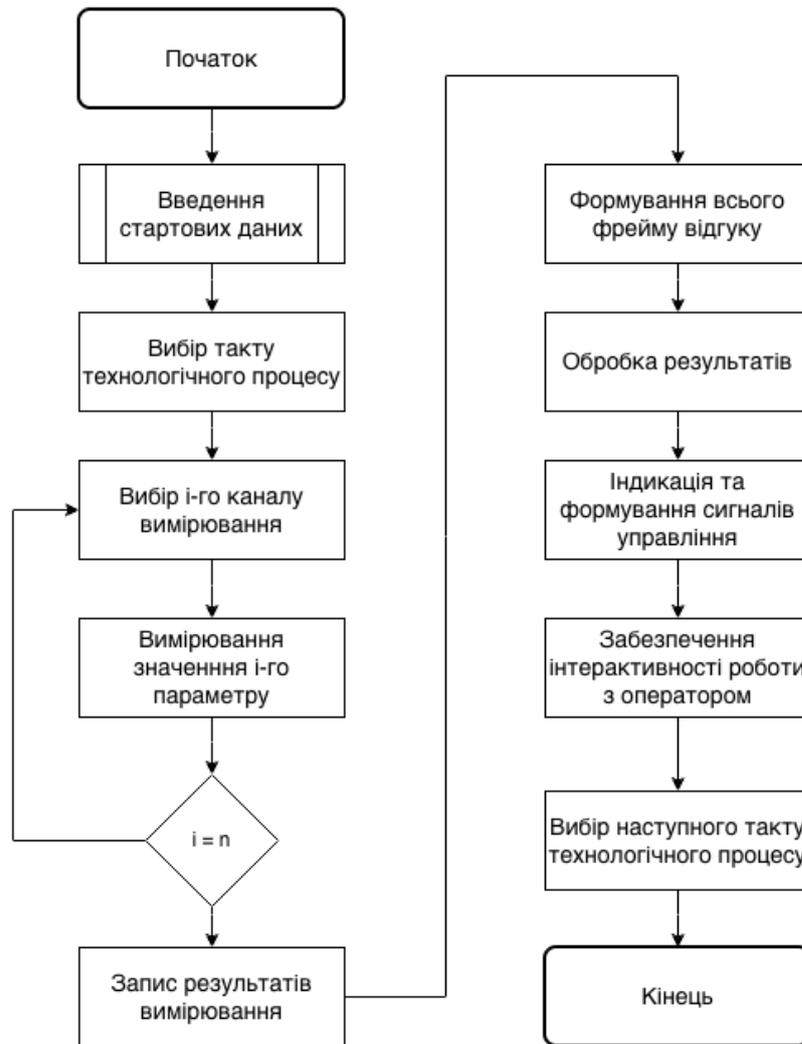


Рисунок 2 - Алгоритм функціонування інтелектуальної ІВС в одному із тактів роботи енергосистеми

Паралельно відбувається процес порівняння результатів вимірювання кожного конкретного параметра технологічного процесу з його допустимими значеннями, які знаходяться в фреймах-еталонах, розміщених у базі знань ІВС [6-8].

На рис 3 приведений фрагмент бази знань інтелектуальної ІВС.

Допустимі значення параметрів технологічного процесу комбінованої енергосистеми задані у вигляді конкретних діапазонів можливих їх значень. Якщо результат вимірювання конкретного параметра технологічного процесу не виходить за межі допустимого діапазону ІВС продовжує опитувати наступні датчики. У випадку, якщо результат вимірювання виходить за межі допустимого діапазону відбувається наступне. Перше. Цей результат виводиться на табло блоку індикації та включається звукова і світлова сигналізація про факт невідповідності значення даного параметра його допустимому діапазону.

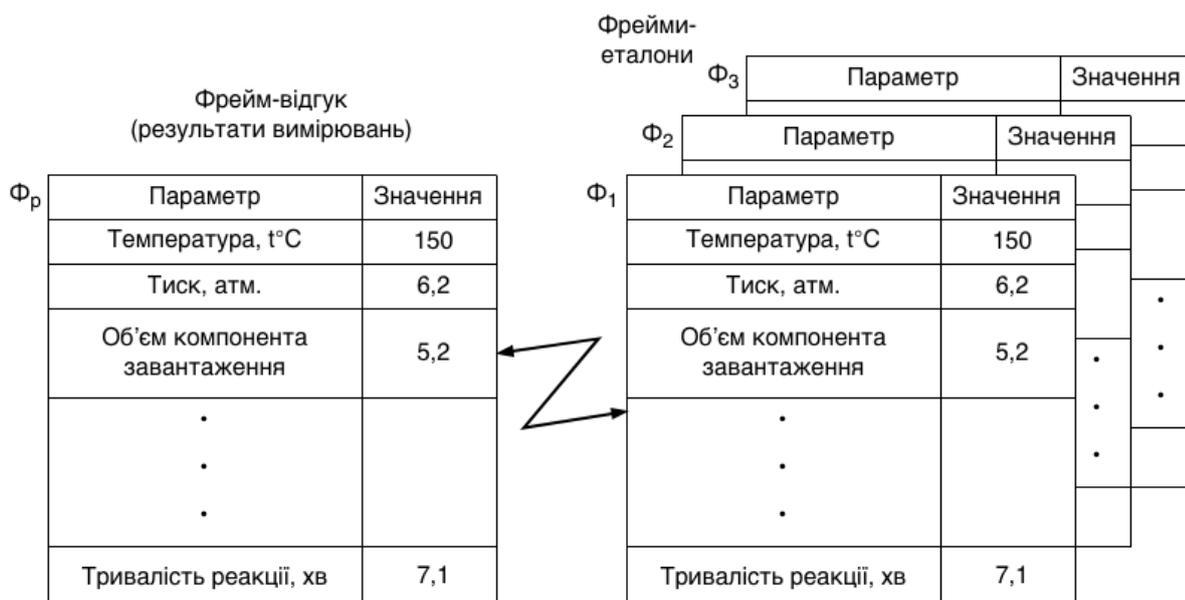


Рисунок 3 - Фрагмент бази знань інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи

Паралельно формується сигнал на систему автоматичного управління роботою комбінованої енергосистеми, який, в залежності від його пріоритету, може або змінити режим роботи енергосистеми, або зупинити його в критичних ситуаціях [7].

Роль оператора даної ПВС зводиться до наступного. Після отримання повідомлення про невідповідність режиму технологічного процесу заданим варіантам, оператор може терміново подати команду або на зміну режиму роботи, або на його термінову зупинку (наприклад, при постійному зростанні тиску в технологічних ємностях комбінованої енергосистеми). Для цього в ПВС передбачений інтелектуальний інтерфейс, до складу якого входить лінгвістичний (діалоговий) процесор, що дозволяє оператору простим голосовим повідомленням керувати системою. При цьому управління побудоване таким чином, щоб пріоритет оператора був вищий за пріоритет ПВС.

В розпорядженні оператора є можливість перевести роботу комбінованої енергосистеми в окремі тимчасові безпечні режими функціонування. ПВС в таких випадках працює в режимі порадики оператора.

Застосування таких алгоритмів роботи комбінованої енергосистеми в сукупності з запропонованою ПВС є доцільним і необхідним на етапах пошуку оптимальних режимів її функціонування.

**Висновки.** Запропонована ПВС дозволяє реалізувати моніторинг протікання технологічного процесу функціонування комбінованої енергосистеми, яка реалізує інноваційну технологію отримання теплової та електричної енергії.

Технічні та метрологічні особливості запропонованої ПВС забезпечують можливість ефективного управління роботою комбінованої енергосистеми, оптимізацію режимів її функціонування та запобігання аварійних ситуацій.

ЛІТЕРАТУРА

1. Зубенко В.О., Березюк І.А., Волков І.В. Використання інформаційних технологій для оптимізації управління споживанням енергії. Таврійський науковий вісник. 2024. № 5. С. 33 – 39. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.5.4>
2. Камбур О., Тюлькіна К., Панова Т. Використання інструментів бізнес аналітики для оцінки перспектив розвитку альтернативних джерел енергії в Україні. Економіка та суспільство. 2022. № 35. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-35-15>
3. Кофанов О. Є., Зозульов О. В., Кофанова О. В. Інноваційність і планування бізнес-процесів стартапів у контексті зеленого енергетичного переходу. Маркетинг і цифрові технології. 2023. Т. 7. № 3. С. 95–114. DOI: <https://doi.org/10.15276/mdt.7.3.2023.7>
4. Щербakov Г.Л., Маліч М.Г. Патент на корисну модель №143959. Спосіб формування енерготехнологічної захисної лісосмуги Щербакoвa. Опубл. 2020, Бюл. № 16
5. Elta catalogue 51, 2019, ISBN 91-88032-8
6. Гуржій А.М., Основи інформаційних технологій, Київ, Літера ЛТД, 2023 – 288 с
7. Романов В.Н., Інтелектуальні засоби вимірювання, РІЦ, 1994 – 280 с.
8. Янковська А.Е., Кузоваткін А.Н., Алгоритми побудови та використання голичних тестів., Штучний інтелект, Донецьк, ПІІІ «Наука і освіта», 2002, №2 – с 330-337.

REFERENCES

1. Zubenko V.O., Bereziuk I.A., Volkov I.V. Vykorystannia informatsiinykh tekhnolohii dlia optymizatsii upravlinnia spozhyvanniam enerhii. [Using information technology to optimize energy consumption management] Tavriyskyi naukovyi visnyk. 2024. No 5. С. 33 – 39. DOI: <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.5.4>
2. Kambur O., Tiulkina K., Panova T. Vykorystannia instrumentiv biznes analityky dlia otsinky perspektiv rozvytku alternatyvnykh dzherel enerhii v Ukraini. [Using business analytics tools to assess the prospects for developing alternative energy sources in Ukraine] Ekonomika ta suspilstvo. 2022. No 35. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2022-35-15>
3. Kofanov O. Ye., Zozulov O. V., Kofanova O. V. Innovatsiynist i planuvannia biznes-protsesiv startapiv u konteksti zelenoho enerhetychnoho perekhodu. [Innovation and business process planning for startups in the context of the green energy transition.] Marketynh i tsyfrovi tekhnolohii. 2023. T. 7. No 3. С. 95–114. DOI: <https://doi.org/10.15276/mdt.7.3.2023.7>
4. Shcherbakov H.L., Malich M.H. Patent na korysnu model №143959. Sposib formuvannia enerhotekhnolohichnoi zakhysnoi lisosmuhy Shcherbakova. [Patent for utility model No. 143959. Method for forming an energy-technological protective forest belt by Shcherbakov]. Опубл. 2020, Бюл. № 16
5. Elta catalogue 51, 2019, ISBN 91-88032-8
6. Hurzhii A.M., Osnovy informatsiinykh tekhnolohii [Fundamentals of Information Technology], Kyiv, Litera LTD, 2023 – 288 с
7. Romanov V.N., Intelktualni zasoby vymiryuvannia, RITs [Intelligent measuring devices], 1994 – 280 с.

Iankovska A.E., Kuzovatkin A.N., Alhorytmy pobudovy ta vykorystannia holichnykh testiv. [Algorithms for constructing and utilising holistic tests], Shtuchnyi intelekt, Donetsk, IPShI «Nauka i osvita», 2002, №2 – с 330-337.

Received 12.09.2025.  
Accepted 15.09.2025.

***Intellectual information and measurement system  
of parameters of the technological process of combined power systems***

*The article considers the development of an intelligent information and measurement system for the parameters of the technological process of combined energy systems, which is based on the concept of distributed energy generation. The actuality of the development is related to increasing the stability and reliability of energy systems in the context of man-made disasters and military conflicts. The purpose of the article is to justify the new structure and features of the intellectual information and measurement system, taking into account the parameters of the technological process of combined energy systems. The intelligent information and measurement system is built using mathematical methods of technological process analysis based on modern element base and computer technologies. The utilisation of such a system enables the monitoring of the technological process of a combined energy system, increases the stability of technological equipment, and significantly improves operational efficiency.*

**Маліч Микола Григорович** - д.т.н., Український державний університет науки та технологій, кафедра галузевого машинобудування, Дніпро, Україна, n22051957m@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4967-5378>

**Щербakov Геннадій Лаврентійович** - к.т.н., ТОВ «Санрайз», Павлоград, Україна, sunrise1@consunrise.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6177-8960>

**Лайков Дмитро Вікторович** - аспірант, Український державний університет науки та технологій, кафедра галузевого машинобудування, Дніпро, Україна, luckydnepr@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6852-2825>

**Герасимчук Віктор Олексійович** - магістр, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, Україна, viktor.gerasimchuk@outlook.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2894-2799>

**Malich Mykola Hryhorovych** - Doctor of Technical Sciences, Ukrainian State University of Science and Technologies, Department of Industrial Engineering, Дніпро, Ukraine, n22051957m@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4967-5378>

**Shcherbakov Hennadii Lavrentiiovych** - Doctor of Technical Sciences (Ph.D.), «Sunrise» LLT, Ukraine, sunrise1@consunrise.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0009-6177-8960>

**Laikov Dmytro Viktorovych** - Postgraduate Student at the Department of Industrial Engineering, Ukrainian State University of Science and Technologies, Ukraine, luckydnepr@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-6852-2825>

**Herasymchuk Viktor Oleksiiovych** - Master Student, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine, viktor.gerasimchuk@outlook.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-2894-2799>

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ СТАЛОГО РОЗВИТКУ

*Анотація.* У статті розглядаються сучасні інформаційні технології супутникового моніторингу та їх застосування для підтримки сталого розвитку в Україні. Проаналізовано європейський досвід інтеграції платформ Copernicus, EO4SD/AgriSense та GoldenRAM, що забезпечують комплексний контроль за станом екологічних, аграрних та промислових процесів із використанням обробки великих об'ємів різнорідних даних, штучного інтелекту та геопросторової аналітики. Визначено проблеми української системи моніторингу та запропоновано методологічні підходи для комплексної оцінки природних та соціально-економічних процесів. Впровадження супутникових технологій сприятиме ефективному управлінню ресурсами, відновленню територій та реалізації національної політики сталого розвитку.

*Ключові слова:* супутниковий моніторинг, дистанційне зондування, інформаційні технології, цілі сталого розвитку, Copernicus, EO4SD, GoldenRAM, природні ресурси.

**Вступ.** Сталий розвиток у сучасних умовах постає як базова концепція формування ефективної соціально-економічної та екологічної політики, що ґрунтується на необхідності гармонізації економічного зростання, раціонального природокористування та збереження довкілля.

Глобальні цілі сталого розвитку (Sustainable Development Goals, SDGs), визначені Організацією Об'єднаних Націй, встановлюють універсальну основу для формування інтегрованої соціально-економічної стратегії та екологічної політики на глобальному рівні [1]. Вони орієнтовані на забезпечення ефективного використання природних ресурсів, підтримку екологічної рівноваги та зміцнення стійкості соціальних і економічних систем до сучасних глобальних та регіональних викликів. Роль цих цілей у досягненні сталого розвитку полягає у формуванні інтегрованого підходу до вирішення проблем, що виникають внаслідок техногенного навантаження, змін клімату та інших глобальних загроз.

Для України, яка перебуває у процесі активної інтеграції в глобальні екологічні та економічні трансформації, розробка та впровадження національної стратегії сталого розвитку набуває особливої значущості. Таке зростання актуальності зумовлене потребами відновлення природних комплексів, трансформованих інтенсивним техногенним навантаженням і наслідками військових дій, а також необхідністю підвищення ефективності управління природними ресурсами на регіональному рівні.

## ГЛОБАЛЬНІ ЦІЛІ Сталого Розвитку



Рисунок 1 - Глобальні цілі сталого розвитку [1]

Одним із ключових бар'єрів на шляху реалізації принципів сталого розвитку залишається нестача своєчасної, достовірної та структурованої інформації про стан природного середовища, динаміку землекористування, особливості функціонування водних та лісових екосистем, а також соціально-економічні процеси. Обмеженість аналітичної інформації ускладнює формування об'єктивного розуміння екологічної ситуації, що перешкоджає прогнозуванню можливих ризиків і знижує результативність управлінських рішень на державному та регіональному рівнях.

Сучасні супутникові технології моніторингу відкривають принципово нові можливості для оперативного отримання, інтеграції та аналізу даних про стан територій, екологічні процеси та техногенні зміни. Використання дистанційного зондування Землі створює підґрунтя для формування цілісної й просторово прив'язаної аналітичної бази, необхідної для оцінювання тенденцій і прогнозування розвитку природних та соціально-економічних систем. Водночас науково-технічна інфраструктура супутникового моніторингу в Україні залишається недостатньо розвиненою: бракує узгоджених підходів до гармонізації джерел даних, методів їх обробки та адаптації технологічних рішень до специфіки регіональних потреб.

У цьому контексті особливої уваги потребує дослідження потенціалу сучасних інформаційних технологій супутникового моніторингу, здатних забезпечити комплексну оцінку екологічних, соціальних та економічних процесів. Їх інтеграція у систему стратегічного планування може стати ключовою передумовою формування науково обґрунтованих рішень і підвищення ефективності державної політики сталого розвитку.

**Постановка проблеми.** У сучасних умовах трансформації природокористування та просторового розвитку України виникає потреба у формуванні цілісної системи моніторингу, здатної забезпечувати своєчасне та об'єктивне відображення стану навколишнього середовища. Інтенсивні техногенні навантаження, деградаційні процеси в екосистемах, наслідки військових дій та зростання масштабів антропогенного впливу зумовлюють ускладнення екологічної ситуації на значній частині території країни. За

таких умов ефективність управління природними ресурсами значною мірою залежить від наявності достовірної, структурованої та просторово деталізованої інформації.

Разом з тим, існуюча інформаційно-аналітична база не забезпечує повного та оперативного охоплення екологічних і соціально-економічних процесів, що відбуваються на регіональному рівні. Традиційні методи збору даних характеризуються обмеженою періодичністю оновлення, нерівномірністю покриття територій та значними витратами ресурсів. Це ускладнює проведення об'єктивної оцінки стану земельних, водних і лісових ресурсів, а також стримує розробку науково обґрунтованих управлінських рішень у сфері сталого розвитку.

Супутникові технології дистанційного зондування Землі відкривають можливості для створення багаторівневої системи моніторингу, що передбачає комплексне поєднання геопросторових, екологічних і соціально-економічних показників. Однак, попри наявність технологічних рішень, в Україні все ще відсутня узгоджена інфраструктура інтеграції супутникових даних у процеси стратегічного планування. Існуючі розрізнені підходи до обробки та інтерпретації інформації не дозволяють повною мірою реалізувати потенціал сучасних методів моніторингу.

Отже, проблема полягає у необхідності формування науково обґрунтованого підходу до використання супутникових даних для комплексної оцінки стану природного середовища та аналізу регіональних соціально-економічних процесів. Вирішення цього завдання є ключовою умовою підвищення ефективності державної та регіональної політики сталого розвитку й забезпечення належного рівня екологічної безпеки.

**Мета і завдання дослідження.** Метою дослідження є наукове обґрунтування застосування сучасних інформаційних технологій супутникового моніторингу для забезпечення комплексного аналізу екологічних, соціальних та економічних процесів в Україні з метою підтримки національної політики сталого розвитку.

Для досягнення поставленої мети необхідно забезпечити вирішення наступних завдань:

1. Провести аналітичний огляд сучасних інформаційних технологій супутникового моніторингу та їх застосування у сфері сталого розвитку.
2. Дослідити специфічні потреби України щодо моніторингу природних ресурсів, землекористування та соціально-економічних процесів на регіональному та національному рівнях.
3. Виявити основні проблеми та обмеження існуючих систем супутникового моніторингу щодо їх інтеграції у процеси сталого розвитку.
4. Розробити концептуальні підходи та методологію використання супутникових даних для комплексної оцінки стану екологічних та соціально-економічних систем в Україні.
5. Обґрунтувати ефективні механізми інтеграції супутникових технологій у національні інформаційні системи, що забезпечують прийняття стратегічно обґрунтованих рішень у сфері сталого розвитку.

Реалізація поставлених завдань дозволить створити науково-методичну основу для ефективного використання супутникових технологій у процесах сталого розвитку

Україні та забезпечить підґрунтя для подальших практичних досліджень і прийняття управлінських рішень.

**Основна частина.** Супутникові інформаційні технології у Європі широко застосовуються для комплексного моніторингу природних, аграрних та промислових процесів, що безпосередньо сприяють досягненню цілей сталого розвитку (ЦСР) [2-9]. Значний потенціал забезпечується такими платформами, як Copernicus, Earth Observation for Sustainable Development (EO4SD), GoldenRAM, AgriSense, GEOSS, MinLand та INSPIRE, які інтегрують різноманітні дані дистанційного зондування Землі, алгоритми обробки великих даних, штучний інтелект та методи машинного навчання [2-11]. Програма Copernicus, реалізована Європейським Союзом, надає відкритий доступ до супутникових даних Sentinel, що використовуються для оцінки стану суші, водних ресурсів, прибережних екосистем атмосфери. Дані Sentinel-1 забезпечують високоточний радарний аналіз земної поверхні, що застосовується для оцінки та контролю підтоплень, руху ґрунтів. Серія Sentinel-2 надає спектральні зображення високої роздільної здатності, які застосовуються для моніторингу рослинного покриву, виявлення деградації ґрунтів та оцінки якості води. Дані Sentinel-3 використовуються для оцінки температури поверхні води, стану морських екосистем та кліматичних показників, а Sentinel-5p забезпечує контроль забруднення атмосфери та концентрації газів. Використання хмарних обчислень і технології Data Cube дозволяє інтегрувати великі масиви даних із різних джерел, здійснювати автоматизовану обробку та формувати аналітичні висновки у режимі реального часу. Інтеграція супутникових даних через глобальні системи, зокрема GEOSS (Global Earth Observation System of Systems), підвищує точність і оперативність прийняття управлінських рішень. Безумовно програма має плани розширення на 6 нових місій серед яких [2]:

- CHIME: Гіперспектральна місія візуалізації навколишнього середовища Copernicus;
- CIMR: Мікрохвильовий радіометр Copernicus Imagine;
- CO2M: Антропогенний моніторинг вуглекислого газу Copernicus;
- CRISTAL: Альтиметр топографії полярного льоду та снігу Copernicus;
- LSTM: Моніторинг температури поверхні землі;
- ROSE-L: Система радіолокаційного спостереження L-діапазону.

Це означає, що з'явиться більше відкритих даних, що дозволить вирішувати більше коло прикладних задач та самим підсилювати роботу над розробкою нових інфраструктур для досягнення цілей сталого розвитку. На рисунку 2 представлено розширення місії Copernicus.

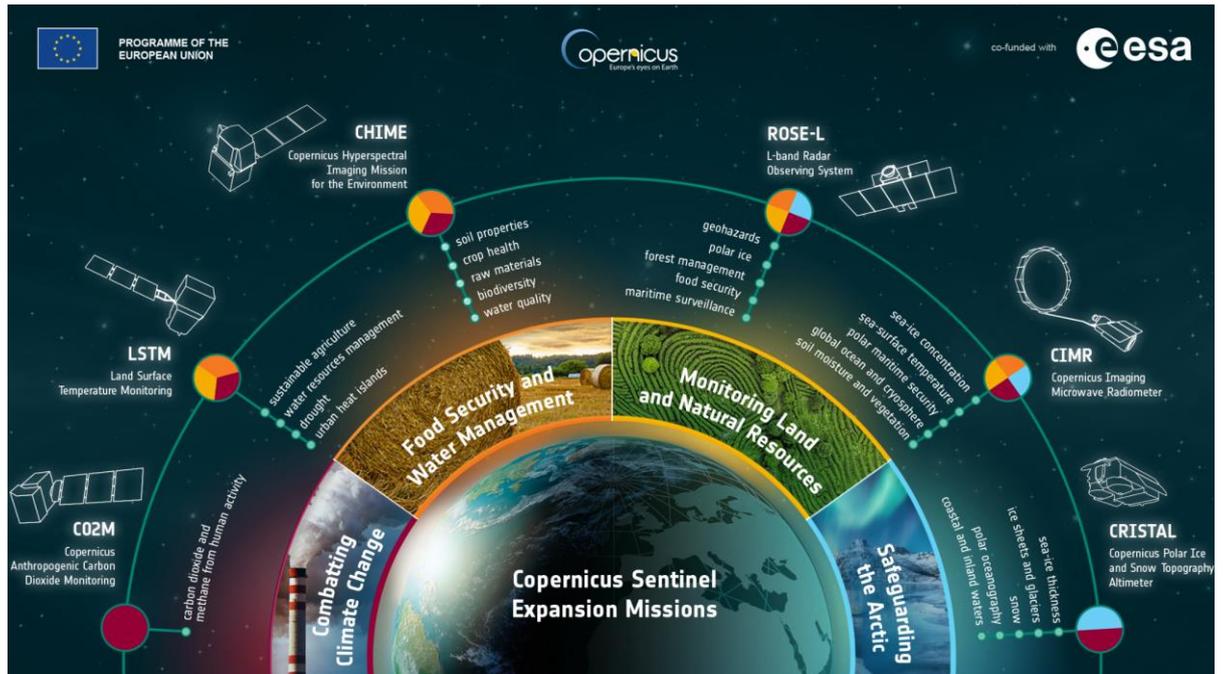


Рисунок 2 - Розширення місії програми Copernicus [2]

У сільському господарстві супутникові технології застосовуються для оцінки стану посівів, вологості ґрунтів, вегетаційних індексів та прогнозування врожайності. Платформа AgriSense поєднують супутникові зображення з локальними метеорологічними даними та використовують алгоритми машинного навчання для моделювання росту культур і оптимізації агротехнологій. EO4SD Agriculture дозволяє прогнозувати врожайність, управляти водними ресурсами та внесенням добрив, підвищуючи ефективність використання земель. Використання хмарних обчислень забезпечує обробку великих обсягів даних у режимі реального часу та формування детальних аналітичних звітів для оперативного управління агропромисловими комплексами [5-8].

Супутникові технології також застосовуються для моніторингу видобутку корисних копалин. Проект Golden RAM інтегрує гіперспектральні та радарні дані високої роздільної здатності, геологічні карти та алгоритми штучного інтелекту для оцінки запасів корисних копалин і контролю екологічних ризиків [10]. Платформи MinLand та INSPIRE сприяють сталому розвитку гірничодобувних регіонів, дозволяють оцінювати деградацію земель та планувати рекультиваційні роботи за допомогою сучасних геопросторових аналітичних інструментів і інтеграції супутникових та наземних даних.

Особлива увага приділяється моніторингу водних ресурсів та прибережних зон. Європейські платформи, такі як Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) та MyOcean, застосовують супутникові дані високої роздільної здатності для контролю якості води, прогнозування підтоплень та оцінки стану морських екосистем. Використання алгоритмів штучного інтелекту та моделей чисельного прогнозування дозволяє своєчасно виявляти потенційні загрози та забезпечувати сталий розвиток водних ресурсів.

Адаптація європейського досвіду до українських умов відкриває значні перспективи для реалізації ЦСР на національному рівні, особливо у контексті відбудови країни після завершення повномасштабної війни. В Україні вже діють національні програми дистанційного зондування Землі, які частково інтегрують дані Sentinel та інших міжнародних супутникових місій. Спираючись на те що Україна є аграрно - промисловою країною, використання сучасних супутникових платформ дозволить здійснювати системний моніторинг стану природних екосистем, оцінювати якість повітря та води в промислових і урбанізованих зонах, а також прогнозувати ризики деградації земель і наслідки стихійних явищ, що є критично важливим для відновлення зруйнованих територій [11]. У аграрному секторі супутникові платформи сприятимуть підвищенню врожайності, оптимізації використання водних ресурсів та забезпеченню продовольчої безпеки. У гірничій промисловості ці технології дозволяють оцінювати стан родовищ, проводити моніторинг видобутку, планувати рекультиваційні роботи та контролювати екологічні ризики. Моніторинг водних ресурсів та прибережних зон на основі супутникових даних, наземних вимірювань та алгоритмів штучного інтелекту сприяє сталому розвитку, відновленню територій та мінімізації негативного антропогенного впливу [11]. Для ефективного впровадження супутникових технологій в Україні у післявоєнний період необхідна розбудова національної обчислювальної та аналітичної інфраструктури, стандартизація геопросторових даних, інтеграція різнорідних джерел інформації та підготовка висококваліфікованих фахівців у сфері дистанційного зондування Землі, обробки великих даних і використання алгоритмів штучного інтелекту. Адаптація сучасних європейських платформ до особливостей території України, забезпечить підвищенню ефективності реалізації ЦСР, природних ресурсів, відновлення та реконструкцію зруйнованих територій, екологічну безпеку та продовольчу стабільність на національному рівні.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження було систематизовано сучасні підходи та технології застосування інформаційних супутникових платформ у контексті досягнення цілей сталого розвитку. Аналіз європейського досвіду засвідчив, що інтеграція супутникових даних із сучасними інформаційно-технологічними інфраструктурами, включно з хмарними обчисленнями, системами машинного навчання та інструментами геопросторової аналітики, забезпечує ефективний моніторинг стану природного середовища та соціально-економічної діяльності.

Особливу увагу було приділено платформам Copernicus, GoldenRAM та EO4SD/AgriSense, які демонструють високий рівень технологічної інтеграції та надають широкий спектр сервісів — від збору та обробки супутникових зображень до формування аналітичних звітів, що використовуються для прийняття управлінських рішень [2-10]. Досвід Європейського Союзу підтверджує значну ефективність таких систем у реалізації завдань екологічного моніторингу, управління земельними ресурсами та контролю за видобутком корисних копалин.

Важливим аспектом є потенційна адаптація зазначених технологій до умов України, особливо у контексті відновлення та сталого розвитку територій після завер-

шення повномасштабної війни. Використання супутникового моніторингу може забезпечити оцінку стану земель, водних ресурсів, інфраструктури та природних екосистем, а також підвищити прозорість і ефективність управлінських рішень на всіх етапах відбудови.

Отже, інформаційні супутникові технології є ключовим інструментом комплексного моніторингу та підтримки сталого розвитку. Їхнє впровадження в національну практику здатне значно підвищити ефективність управління природними ресурсами, зменшити негативний вплив антропогенних факторів на навколишнє середовище та сприяти формуванню науково обґрунтованих стратегій розвитку держави.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Sustainable Development Strategy: European Horizons [Electronic resource]: Textbook / I. Yakymenko, L. Petrashko, T. Dyman, O. Salavor, E. Shapovalov, M. Galaburda, O. Nychyk, O. Martyniuk. – К. : NUFT, 2022. – 337 p.
2. Аналітичні матеріали, Copernicus Operations URL: [sentiwiki.copernicus.eu](https://sentiwiki.copernicus.eu)
3. Аналітичні матеріали, ESA. EO Framework (EOF) – CSC – Architecture. ESA Earth Observation Framework. 16 червня 2024. URL: [eof.esa.int](https://eof.esa.int)
4. Аналітичні матеріали, ESA. EO Framework (EOF) – CSC – Specifications. ESA Earth Observation Framework. 12 червня 2025. URL: [eof.esa.int](https://eof.esa.int)
5. Аналітичні матеріали, ESA. EOF – CSC Operations Concept, Ground Segment Architecture. ESA / Copernicus (PDF). URL: [sentiwiki.copernicus.eu](https://sentiwiki.copernicus.eu)
6. Аналітичні матеріали, EO4EU. “EO4EU Platform: A comprehensive architecture tailored to your goals.” EO4EU. URL: [eo4eu.eu+1](https://eo4eu.eu+1)
7. Аналітичні матеріали, EO4EU. “An Integrated and Scalable Platform for Accessing and Analyzing Earth Observation Data.” (EGI2024). URL: [eo4eu.eu](https://eo4eu.eu)
8. Аналітичні матеріали, EO4EU. “Unlocking Multi-Cloud Observability in the EO4EU Platform.” (White Paper) URL: [eo4eu.eu](https://eo4eu.eu)
9. Аналітичні матеріали, EO4EU. “AI-Augmented Ecosystem for Earth Observation Data” (теоретичне обґрунтування і архітектура). URL: [eo4eu.eu](https://eo4eu.eu)
10. Аналітичні матеріали, CORDIS / European Commission. “GoldenRAM – EO Platform Supporting Critical Raw Materials Industry in Europe” (Project fact sheet). URL: [CORDIS+2CORDIS+2](https://cordis+2cordis+2)
11. Kavats, O., Khramov, D., & Sergieieva, K. (2022). Surface Water Mapping from SAR Images Using Optimal Threshold Selection Method and Reference Water Mask. *Water*, 14(24), 4030, DOI: <https://doi.org/10.3390/w14244030>.

Received 17.09.2025.  
Accepted 22.09.2025.

#### ***Information technologies for satellite monitoring of sustainable development***

*This article examines modern satellite monitoring information technologies and their application for supporting sustainable development in Ukraine. The concept of sustainable development is considered as a foundation for forming effective socio-economic and environmental policies, aimed at harmonizing economic growth, rational natural resource management, and environmental protection. Particular attention is given to the challenges of restoring natural complexes and effectively managing land, water, and forest resources, which*

*have been exacerbated by intensive anthropogenic pressures and the consequences of the full-scale war.*

*The European experience of integrating satellite platforms, such as Copernicus, EO4SD/AgriSense, and GoldenRAM, is analyzed, demonstrating the high efficiency of comprehensive monitoring of environmental, agricultural, and industrial processes through the use of big data processing algorithms, artificial intelligence, and geospatial analytics. It is shown that the integration of satellite data with modern IT infrastructures enables operational control of ecosystem status, crop yield forecasting, water resource management, and assessment of ecological risks associated with mineral extraction.*

*The article identifies key challenges for the Ukrainian monitoring system, including insufficient national computing infrastructure, lack of standards for integrating heterogeneous data sources, and a shortage of qualified specialists. Conceptual approaches and methodologies for using satellite data to comprehensively assess the state of environmental and socio-economic systems in Ukraine are proposed.*

*It is substantiated that the implementation of these technologies will enhance the effectiveness of national sustainable development policies, increase transparency in decision-making, support post-war restoration and reconstruction of territories, ensure environmental safety, and promote food security at the national level.*

**Кавац Олена Олександрівна** - к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0172-7856>

**Kavats Olena Oleksandrivna** - Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0172-7856>

Д. Божуха, О. Байбуз

## МОДЕЛЬ СПІЛЬНОГО ДИНАМІЧНОГО РОЗВАНТАЖЕННЯ ХМАРНОЇ АРХІТЕКТУРИ З БАЛАНСУВАННЯМ РІВНІВ

*Анотація.* Останніми роками для вирішення задачі оброблення великого обсягу запитів з низькою затримкою науковцями запропоновано велика кількість підходів для отримання характеристик хмарної архітектури, що можуть використовувати принципи побудови системи.

У роботі розглядається можливість створення гібридної системи, яка у своєму складі має типову систему граничних, туманних та хмарних обчислень для дослідження питання оптимізації навантаження за рахунок перерозподілу частини завдань між пристроями на рівнях. Наведено опис моделі, яка поєднує принципи проектування граничних, туманних та хмарних обчислень. Для перевірки опису побудованої моделі використана модель з обмеженою кількістю пристроїв у своєму складі. Проведено аналіз отриманих даних про зв'язок між стратегією та функцією траєкторії навантаження хмарної системи.

*Ключові слова:* математична модель, система хмарних обчислень, послідовність процесів, балансування навантаження.

### Постановка проблеми

Активне використання хмарних систем різних типів та архітектури в прикладних задачах та отримання великої кількості даних на реальних експериментах відкриває нові напрями дослідження мінімізації та прогнозування навантаження, вибору стратегії швидкого розвантаження системи, що формує достатньо велику кількість інформаційних технологій для моніторингу, управління та адаптації ресурсів хмарного сервісу у режимі реального часу.

Важливою задачею стає вибір архітектури хмарної системи та стратегії її розвантаження на етапі проектування з використанням наявних ресурсів та їх характеристик, що вимагає аналізу структури хмарного сервісу та вибору існуючих інформаційних технологій.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

Останні дослідження, які пов'язані з хмарними системами, пропонують парадигми обчислень для вирішення великого обсягу завдань різного типу з мінімальною затримкою. Запропоновані парадигми можуть використовувати ресурси, пристрої, вузли та кластери хмарного центру. Але основним завданням створення таких парадигм є вирішення проблеми розвантаження системи хмарних обчислень при використанні ком-

бінації існуючих та нових підходів. Наприклад, при дослідженні хмарної архітектури, яка запропонована у вигляді ієрархічної системи граничного туману [1], запропоновано звернути увагу на зміщення між рівнями системи відповідно до толерантності користувача до затримки. У багатьох роботах науковців приділена увага задачі використання методів машинного навчання для вирішення проблем розвантаження обчислень та управління мобільністю хмарної системи на різних рівнях її архітектури. Актуальним напрямом розвитку хмарних обчислень є вирішення проблеми прогнозування навантаження (проактивна оптимізація) з вбудовуванням в систему інтелектуальних агентів для моніторингу, управління та адаптації ресурсів хмарного сервісу режимі реального часу, які взаємодіють між собою та центральними оркестраторами для автономного масштабування та самовідновлення системи [2]. Для дослідження більш складної структури системи хмарних обчислень використана ідея автора роботи [3] щодо запропонованої стратегії динамічного спільного розвантаження хмарних граничних пристроїв з урахуванням балансування навантаження.

### **Мета дослідження**

Метою дослідження є розгляд стратегії динамічного спільного розвантаження хмарних пристроїв з урахуванням балансування навантаження на граничних серверах та балансування підключення на туманних вузлах для багаторівневої структури системи хмарних обчислень. Проведення експериментів та аналіз отриманих результатів.

### **Викладення основного матеріалу дослідження**

Автором роботи [3] представлено архітектурне рішення хмарної системи з рівнями кінцевих пристроїв (DL), граничних серверів (EL) та хмарного центру (CL). В запропонованому дослідженні додано рівень туману (FL) для наближення моделі системи хмарних обчислень до реальної. Типовий робочий процес системи хмарних обчислень формується з декількох етапів: користувачі створюють завдання, кінцеві пристрої рівня DL розподіляють отримані завдання на граничні сервери рівня EL через основну мережу під керуванням схеми розвантаження рівня DL, граничні сервери розміщують отримані завдання у черзі, на кожному граничному сервері частина завдань оброблюється локально, а інша частина може переноситися на інші граничні сервери для балансування навантаження на рівні EL; паралельно завдання можуть перенаправлятися за рахунок роботи схеми керування щодо вибору маршрутизаторів підключення рівня FL; частина завдань рівня FL може бути також перенаправлена за рахунок роботи хмарного центру для віддаленої допомоги під керуванням схеми розвантаження хмари, після оброблення завдання надходять на кінцеві пристрої до користувачів з граничних серверів, туманних вузлів або з хмарного центру.

### Математичне формулювання задачі.

Розглянемо гібридну систему, яка включає в себе типову систему граничних, туманних та хмарних обчислень для дослідження питання оптимізації навантаження за рахунок перенесення частини завдань з граничних серверів до маршрутизатора підключення, а з туманних вузлів до хмарного центру. Частина цієї системи при включенні першого та останнього рівнів з архітектури (граничний та хмарний) представляє собою

СЕЕ, що забезпечує послуги з низькою затримкою для кінцевих користувачів через граничні сервери [3].

Розглянемо систему хмарних обчислень, у складі якої є  $N$  кінцевих користувачів, ES граничних серверів та FR маршрутизаторів навантаження. Нехай множина кінцевих користувачів  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_N\}$ , множина граничних серверів  $S = \{s_1, s_2, \dots, s_{ES}\}$ , множина туманних вузлів (маршрутизаторів підключення)  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_{FR}\}$ . В будь-який момент часу  $t \in [0, T]$  швидкість виконання завдань кінцевими пристроями  $u_i$  рівня DC позначимо як  $v_{1,i}^{task}(t)$ , швидкість виконання завдань граничними серверами  $s_j$  рівня EC позначимо як  $v_{2,j}^{task}(t)$  та швидкість виконання завдань туманними вузлами  $r_k$  рівня FC позначимо як  $v_{3,k}^{task}(t)$ . Швидкість хмарного центру позначимо як  $v_{4,1}^{task}(t)$ . Частка завдань, які є вивантаженими у момент часу  $t \in [0, T]$  з кінцевого пристрою  $u_i$  на граничний сервер  $s_j$ , з граничного серверу  $s_j$  на туманний вузол  $r_k$  та з туманного вузлу до хмарного центру позначимо відповідно  $x_{ij}^{US}(t)$ ,  $x_{jk}^{SR}(t)$  та  $x_{k1}^{RC}(t)$ . Функція  $x(t) = \{x_{ik}(t)\}_{N \times FR}$  для  $t \in [0, T]$  є стратегією розвантаження рівнів DC, EC та FC. Навантаження (довжина черги завдань) граничних серверів  $s_j$  та туманних вузлів  $r_k$  позначено як  $q_j^{EC}(t)$  та  $q_k^{FC}(t)$  відповідно. Навантаження хмарного центру позначимо функцією  $q^{bal}(t)$ . Прослідкувати за траєкторією навантаження можна за допомогою функції

$$Balance(t) = \{q_1^{EC}(t), \dots, q_{ES}^{EC}(t), q_1^{FC}(t), \dots, q_{FR}^{FC}(t), q^{bal}(t)\}$$

Після надходження завдань до черг пристроїв виконується часткове їх локальне оброблення або перенесення на інші пристрої за допомогою схем розвантаження/підключення з подальшим вивантаженням на наступні рівні. Визначимо швидкості перенесення власних завдань з  $S_n$  на інший  $S_m$  для контролю балансування навантаження рівня EC через функцію  $f_{level}(n, m, q_n^{level}(t), t)$ .

Стратегію розвантаження хмари визначає множина

$$y(t) = \{y_k(t)\}_{k=1}^{FR} = \{v_{3,k}^{task}(t)x_{k1}^{RC}(t)\}_{k=1}^{FR}, \quad t \in [0; T]$$

Математичний вираз стратегій розвантаження системи

Розглянемо набір функцій  $x(t)$  та  $y(t)$ , які є стратегіями розвантаження рівнів системи (у визначеному прикладі, це рівні DC, EC та FC) та хмарного рівня для  $t \in [0; T]$ . Множина стратегій розвантаження системи може бути представлена як:

$$\Phi = \{(x, y): x \in \mathbb{R}^{N \times ES} \times \mathbb{R}^{ES \times FR}, y \in \mathbb{R}^{FR} |$$

$$x_{ij}(t) \in [0; 1], x_{jk}(t) \in [0; 1], \sum_{j=1}^{ES} x_{ij}^{US}(t) = 1, \sum_{k=1}^{FR} x_{jk}^{SR}(t) = 1,$$

$$y_k(t) \in [0; y_{max}], i = 1, \dots, N, j = 1, \dots, ES, k = 1, \dots, FR, t \in [0; T] \}$$

Розглянемо можливість збільшення/зменшення навантаження на рівень DC, яке пов'язано з змінами кількості запитів від користувача  $\Delta R_i(t) = R_i(t + \Delta t) - R_i(t)$  протягом інтервалу часу  $[t; t + \Delta t]$ .

Дослідження зв'язку між стратегією та функції траєкторією навантаження

Надалі вважаємо, що кожний об'єкт побудованої схеми системи має чергу завдань нескінченної довжини (без пріоритетів).

Навантаження рівня СС в момент часу  $t + \Delta t$  дорівнює:

$$q^{bal}(t + \Delta t) =$$

$$= q^{bal}(t) + \Delta t \sum_{k=1}^{FR} \delta(q_k^{FC}(t)) v_{3,k}^{task}(t) x_{k1}^{RC}(t) - \Delta t \delta(q^{bal}(t)) v_{4,1}^{task}(t)$$

Навантаження рівнів FC та EC в момент часу  $t + \Delta t$  залежить від швидкості виконання/опрацювання завдань пристроями рівнів, частки вивантажених завдань з пристроїв рівнів, швидкостей перенесення завдань між пристроями на рівні (балансування), наявності черги та її довжини.

Траєкторія навантаження функції *Balance*( $t$ ) залежить від множини стратегій розвантаження  $\Phi(x, y)$  динамічної системи:

$$q^{bal}(t) = Q_0, t \in [0, T]$$

$$(q_k^{FC}(t + \Delta t) - q_k^{FC}(t)) / \Delta t, k = 1, 2, \dots, FR, t \in [0, T]$$

$$(q_j^{EC}(t + \Delta t) - q_j^{EC}(t)) / \Delta t, j = 1, 2, \dots, ES, t \in [0, T]$$

**Висновки**

У результаті дослідження отримано модель еволюції навантаження багаторівневої системи для аналізу впливу обраних стратегій для вирішення задачі розвантаження рівнів системи. Запропоновано модель багаторівневої системи, яка поєднує принципи проектування граничних, туманних та хмарних обчислень, в якій при перевантаженості пристроїв на рівнях системи частина завдань може бути частково перерозподілена.

Надалі можна розглянути гібридну систему, яка включає в себе типову систему граничних, туманних та хмарних обчислень для дослідження питання оптимізації навантаження за рахунок перенесення частини завдань з граничних серверів та з туманних вузлів одразу до хмарного центру або з граничних серверів, туманних вузлів, хмарного центру до центру контролю навантаження.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Diamanti M, Charatsaris P, Tsiropoulou EE, Papavassiliou S. Incentive mechanism and resource allocation for edge-fog networks driven by multi-dimensional contract and game theories. IEEE Open Journal of the Communications Society. 2022;3:435–452.
2. Bodra D and Khairnar S (2025) Machine learning-based cloud resource allocation algorithms: a comprehensive comparative review. Front. Comput. Sci. 7:1678976. - DOI: 10.3389/fcomp.2025.1678976
3. Fan Y (2024) Load balance -aware dynamic cloud-edge-end collaborative offloading strategy // PLOS ONE 19(1): e0296897. - URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296897>

**REFERENCES**

1. Diamanti M, Charatsaris P, Tsiropoulou EE, Papavassiliou S. Incentive mechanism and resource allocation for edge-fog networks driven by multi-dimensional contract and game theories. IEEE Open Journal of the Communications Society. 2022;3:435–452.
2. Bodra D and Khairnar S (2025) Machine learning-based cloud resource allocation algorithms: a comprehensive comparative review. Front. Comput. Sci. 7:1678976. - DOI: 10.3389/fcomp.2025.1678976
3. Fan Y (2024) Load balance -aware dynamic cloud-edge-end collaborative offloading strategy // PLOS ONE 19(1): e0296897. URL:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0296897>

Received 25.09.2025.  
Accepted 30.09.2025.

***A model of joint dynamic offloading of cloud architecture  
with load balancing of layers***

*Analysis of recent studies and publications. Recent research related to cloud systems offers computing paradigms for solving a large number of tasks of various types with minimal latency. The proposed paradigms can use resources, devices, nodes and clusters of the cloud center. But the main task of creating such paradigms is to solve the problem of offloading the cloud computing system using a combination of existing and new approaches. For example, when studying the cloud architecture, which is proposed in the form of a hierarchical boundary fog system [1], it is proposed to pay attention to the shift between the levels of the system according to the user's tolerance for latency. Many works of scientists have paid attention to the problem of using machine learning methods to solve the problems of offloading calculations and managing the mobility of the cloud system at different levels of its architecture. The current direction of cloud computing development is to solve the problem of load forecasting (proactive optimization) with the integration of intelligent agents into the system for monitoring, managing and adapting cloud service resources in real time, which interact with each other and central orchestrators for autonomous scaling and self-healing of the system [2].*

*To study a more complex structure of the cloud computing system, the author's idea of the work [3] was used regarding the proposed strategy of dynamic joint unloading of cloud edge devices taking into account load balancing.*

*Purpose of research. The purpose of the study is to consider a strategy for dynamic joint offloading of cloud devices, taking into account load balancing on edge servers and connection balancing on fog nodes for a multi-tier structure of a cloud computing system. Conducting experiments and analyzing the results.*

*Presentation of the main research material. The author of the work [3] presented an architectural solution of a cloud system with the levels of end devices (DL), edge servers (EL) and cloud center (CL). In the proposed study, a fog level (FL) was added to approximate the model of the cloud computing system to the real one. A typical workflow of a cloud computing system is formed from several stages: users create tasks, end devices of the DL level distribute the received tasks to edge servers of the EL level through the main network under the control of the DL level offloading scheme, edge servers place the received tasks in a queue, on each edge server part of the tasks is processed locally, and the other part can be transferred to other edge servers for load balancing at the EL level; in parallel, tasks can be redirected due to the operation of the control scheme for selecting connection routers of the FL level; Part of the FL level tasks can also be redirected through the work of the cloud center for remote assistance under the control of the cloud offload scheme, after processing the tasks are delivered to the end devices to users from edge servers, fog nodes or from the cloud center.*

*Conclusions. As a result of the study, a model of the evolution of the load of a multi-tier system was obtained to analyze the impact of the selected strategies for solving the problem of unloading the system levels. A model of a multi-tier system was proposed that combines the principles of edge, fog and cloud computing design, in which, when devices at the system levels are overloaded, part of the tasks can be partially redistributed.*

*In the future, a hybrid system can be considered that includes a typical edge, fog and cloud computing system to study the issue of load optimization by transferring part of the tasks from edge servers and fog nodes directly to the cloud center or from edge servers, fog nodes, cloud center to the load control center.*

*Keywords: mathematical model, cloud computing system, process sequence, load balancing.*

**Байбуз Олег Григорович** - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інженерії програмного забезпечення та інформаційних технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, bozhukha\_d@365.dnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-6952>

**Божуха Даніїл Ігорович** – аспірант, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, bozhukha\_d@365.dnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6869-4415>

**Baibuz Oleh** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Software Engineering and Information Technologies, Oles Honchar Dnipro National University, bozhukha\_d@365.dnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7489-6952>

**Bozhukha Daniil** – postgraduate student, Oles Honchar Dnipro National University, bozhukha\_d@365.dnu.edu.ua, ORCID: <https://orcid.org/0009-0007-6869-4415>

В. Гнатушенко, Д. Грищак, Ю. Олевська, В. Олевський, І. Удовик  
**МЕТОДОЛОГІЯ ОБ'ЄДНАННЯ ДАНИХ  
БАГАТОКАНАЛЬНИХ ЗОБРАЖЕНЬ**

*Анотація. Актуальність теми дослідження. У сучасних дослідженнях та практичному застосуванні багатоканальних зображень, отриманих з різних джерел, таких як аеро-космічні сенсори та медичні системи візуалізації, виникає необхідність ефективного об'єднання даних.*

*Постановка проблеми. Необхідно розробити методологію об'єднання зображень із різними спектральними характеристиками для отримання більш точної інформації про земну поверхню.*

*Мета та методи дослідження. Мета полягає у розробці методології об'єднання багатоканальних зображень задля покращення точності аналізу, підвищення інформативності та зниження впливу шумів. Запропонована методологія базується на використанні математичних моделей для гармонізації різнорідних даних, включаючи алгоритми попереднього препроцесингу, спектрального аналізу та машинного навчання. Розглянуто адаптацію підходів для специфічних завдань: об'єднання даних дистанційного зондування Землі для картографічного аналізу та злиття зображень різної модальності (наприклад, МРТ, КТ та УЗД) для діагностичних цілей.*

*Результати та ключові висновки. Проведені експерименти демонструють підвищення якості результатів при використанні запропонованого підходу. Отримані результати підтверджують, що інтеграція багатоканальних зображень дозволяє досягти кращої деталізації, зменшити помилки ідентифікації об'єктів та забезпечити більш точну візуалізацію. Розроблена методика є універсальною та може бути застосована в багатьох галузях, включаючи екологічний моніторинг, планування міських територій, медичну діагностику та робототехніку.*

*Ключові слова: багатоканальні зображення, препроцесинг, спектральний аналіз, машинне навчання.*

**Постановка проблеми.** У сучасних дослідженнях та прикладних завданнях, які потребують аналізу багатоканальних зображень, виникає проблема об'єднання даних з різних джерел. У аерокосмічній галузі об'єднання зображень із різними спектральними характеристиками дозволяє отримати більш точну інформацію про земну поверхню. У медичній сфері інтеграція зображень різної модальності (наприклад, КТ, МРТ, ПЕТ) сприяє підвищенню точності діагностики. Проте ці процеси ускладнюються різницею у

просторовій роздільній здатності, масштабах, спектральних діапазонах та шумових характеристиках даних.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Об'єднання багатоканальних зображень є важливим завданням у багатьох наукових і прикладних галузях, таких як дистанційне зондування Землі. В останні роки велика увага приділяється розробці методик, які дозволяють гармонізувати різноманітні дані, покращуючи їх інформативність і точність аналізу. Методи об'єднання багатоканальних зображень активно розробляються впродовж останніх десятиліть. У аерокосмічних дослідженнях широко використовуються методи паншарпенінгу, спектральної декомпозиції та машинного навчання (наприклад, згорткові нейронні мережі). Застосовуються методи, базовані на вейвлет-перетворенні, гібридному аналізі та технологіях штучного інтелекту. Проте, більшість існуючих підходів орієнтовані на специфічні задачі та не завжди є універсальними. Це підкреслює необхідність розробки узагальненої методики, яка враховує особливості багатоканальних аерокосмічних зображень. Нижче розглянуто основні підходи до об'єднання даних, їх застосування та перспективи розвитку.

Методи об'єднання багатоканальних аерокосмічних зображень базуються на врахуванні спектральних, просторових і часових характеристик даних. Паншарпенінг є одним із найпоширеніших методів об'єднання, який дозволяє підвищити просторову роздільну здатність багатоспектральних зображень за рахунок інтеграції зображень високої роздільності. Наприклад, у роботі [1] наведено алгоритми паншарпенінгу, які використовуються в супутникових системах Sentinel-2 та Landsat-8.

Спектральна декомпозиція і використання методів головних компонент (PCA) дозволяє зменшити розмірність спектральних даних та усунути кореляції між каналами. Richards та Jia [2] запропонували застосування PCA для злиття зображень дистанційного зондування, що підвищує їх інформативність.

Сучасні методи машинного навчання, засновані на згорткових нейронних мережах (CNN), демонструють високу ефективність у задачах об'єднання даних. Наприклад, у [3] описали використання CNN для об'єднання спектральних зображень із метою точного картографічного аналізу.

У медичній сфері об'єднання даних дозволяє інтегрувати зображення різних модальностей (КТ, МРТ, УЗД), забезпечуючи комплексний підхід до діагностики. Вейвлет-перетворення використовується для злиття зображень із різною контрастністю та глибиною. У роботах [4] запропоновано адаптивні алгоритми вейвлет-перетворення для об'єднання МРТ та КТ зображень.

Комбінація вейвлет-аналізу та PCA дозволяє ефективно об'єднувати медичні зображення різних модальностей. У дослідженні Wang et al. [5] було розроблено алгоритм для інтеграції даних МРТ і ПЕТ з метою підвищення точності діагностики онкологічних захворювань.

У медичних дослідженнях активно використовуються моделі глибокого навчання для автоматичного об'єднання даних. Ronneberger et al. [6] представили архітектуру U-Net, яка ефективно обробляє медичні зображення для сегментації та інтеграції.

Серед усіх розглянутих методів значну перевагу мають підходи на основі машинного навчання, зокрема CNN, завдяки їхній здатності адаптуватися до специфічних задач і враховувати складні взаємозв'язки між каналами. Проте класичні методи, такі як PCA і вейвлет-перетворення, залишаються актуальними завдяки своїй простоті і низькій обчислювальній складності.

Розвиток методологій об'єднання даних багатоканальних зображень, особливо із застосуванням машинного навчання, є перспективним напрямком для поліпшення аерокосмічних даних (об'єднання оптичних і радіолокаційних знімків). Застосування зазначених підходів можливо також для загального розвитку якості комп'ютерного зору шляхом злиття RGB і монохромних зображень для збільшення бітової глибини. Однак більшість підходів мають обмежену універсальність і потребують адаптації до конкретних типів даних. Для вибору оптимальної методики важливо враховувати ціль об'єднання, якість вихідних даних і обчислювальні ресурси. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення універсальних алгоритмів, здатних гармонізувати характеристики зображень із різних джерел.

**Мета дослідження** полягає у розробці та вдосконаленні методології об'єднання багатоканальних зображень задля покращення точності подальшого тематичного аналізу, підвищення інформативності та зниження впливу шумів.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Об'єднання багатоканальних зображень відрізняється в залежності від їх виду. Найбільш часто потрібно обробляти декілька зображень, отриманих з однієї точки спостереження, але з різними роздільною здатністю, кольоровою гамою та спектральними характеристиками. Інший випадок – це коли потрібно об'єднувати зображення одного і того ж об'єкту, отриманих з різних точок спостереження у різних масштабах. Це принципово різні випадки і вони потребують різних методів обробки. Але на першому етапі в обох випадках потрібна попередня обробка знімків: калібрування та виправлення спотворень, аналіз спектральних характеристик для виявлення типів об'єктів (рослинність, техніка, ґрунт), геологічна прив'язка для точного визначення координат. Основні методи попередньої обробки багатоканальних знімків – це просторове об'єднання, фузія (злиття даних) та частотний аналіз [7].

Просторове об'єднання виконується шляхом інтеграції просторових даних із різних каналів. Для цього використовуються методи ресемплінгу (Resampling) для вирівнювання просторових роздільностей каналів (білінарна, кубічна, найближчого сусіда) і геометрична реєстрація (використання контрольних точок або алгоритмів автоматичного вирівнювання для узгодження зображень різних каналів).

Злиття даних із кількох каналів для покращення якості або виділення корисної інформації використовує методи паншарпенінгу (Pansharpening, об'єднання високоякісного панхроматичного зображення з багатоспектральними даними), індексного аналізу (розрахунок індексів типу NDVI, NDBI тощо на основі спектральних каналів) і змішування пікселів (Pixel-level fusion, усереднення або об'єднання даних на рівні окремих пікселів).

Перехід у частотну область для злиття або аналізу спектральних компонентів, тобто частотний аналіз, включає дискретне перетворення Фур'є (FFT), Wavelet-трансформацію і перетворення Габора для об'єднання зображень через аналіз текстур.

Попередню обробку зображень можливо провести, наприклад за методологією [8], що включає:

- корекцію геометрії: усунення спотворень, викликаних рухом супутника або атмосферними умовами,
- атмосферну корекцію: видалення впливу атмосфери на спектральні дані,
- нормалізацію яскравості: приведення зображень до єдиного масштабу яскравості для подальшого аналізу.

Найбільш перспективною є розроблена у роботах [9, 10] нова технологія геометричної та спектральної корекції космічних зображень високого просторового розрізнення з урахуванням фізичних механізмів фіксації інформації. Для визначення ефективності розробленої інформаційної технології отримані кількісні оцінки якості синтезованих багатоканальних зображень, зокрема ентропія по Шеннону, сигнальна ентропія та інші. В роботі [11] пропонується метод об'єднання на основі використання пакетної побудови вейвлет-базисів з декореляцією первинних видових даних, бікубічної інтерполяції, перетворення RGB зображень у формат HSV та гіперсферичного перетворення (НСТ) [12]. Основними етапами перетворення первинних багатоканальних зображень є завантаження фотограмметричних моноканальних (МКЗ) і багатоканальних (БКЗ) зображень, отриманих зі супутника; потім передискретизація БКЗ і приведення його розмірності до розмірності МКЗ на основі бікубічної інтерполяції. Далі проводиться геометрична, радіометрична та контрастна корекція БКЗ та МКЗ і перетворення зображення з формату RGB в кольорову систему HSV. Після заміни компоненти яскравості багатоканального зображення такою ж компонентною монохромного зображення, проводиться обернене перетворення отриманого на попередньому етапі зображення з формату HSV в кольорову систему RGB. Отримане зображення вже буде мати підвищене просторове розрізнення у порівнянні з первинним знімком у натуральних кольорах. Наступним етапом є застосування розробленого методу геометричної та спектральної корекції за допомогою пакетного вейвлет-перетворення, також представленого в [12]. Зворотний пакетний вейвлет-розклад та одержання зображення БКЗ у форматі RGB дозволяє зробити перетворення 8-канального зображення, яке після інтерполяції в гіперсферичний колірний простір НСТ і зворотного НСТ-перетворення призводить до отримання результату злиття. Аналіз отриманих результатів показує, що використанні запропонованої методики підвищує якість первинних космічних знімків та якість розпізнавання об'єктів на 10–12%.

В розробленому в цій роботі алгоритмі (рис.1) ми будемо користуватися модифікованою технологією, яка використовує розроблену нами багатовимірну інтерполяцію типу Паде, яка є більш точною та компактною [13].



Рисунок 1 – Схема розробленого алгоритму препроцесингу БКЗ

Подальша обробка декількох зображень, отриманих з однієї точки спостереження, виконуються з використанням методів машинного навчання та математичного моделювання (аналізу головних компонент, статистичних підходів та гібридних методів). Використання сучасних алгоритмів машинного та глибокого навчання для аналізу багатоканальних зображень включає методи кластеризації (K-Means, DBSCAN) для групування спектральних даних, глибокі нейронні мережі (CNN) для сегментації, класифікації та об'єднання каналів, генеративно-змагальні мережі (GAN) для створення нового об'єднаного зображення.

Методи аналізу головних компонент (PCA) або незалежного компонентного аналізу (ICA) дозволяють зменшити кількість каналів із збереженням основної інформації шляхом виділення головних компонент і створення об'єднаного зображення.

Методи на основі статистичних підходів використовуються для врахування невизначеності при злитті даних (Байсове оцінювання) та об'єднання каналів із урахуванням їхньої важливості (середньозважене об'єднання). Гібридні методи поєднують декілька підходів, наприклад, поєднання PCA для зменшення кількості каналів і глибоких нейронних мереж для аналізу залишкових компонент.

Коли потрібно об'єднувати зображення одного і того ж об'єкту, отриманих з різних точок спостереження у різних масштабах, необхідно проводити додатково моделювання досліджуваного об'єкту і використовувати методи типу OSINT-технологій. Об'єднання інформації різних зображень є важливим процесом в комп'ютерному зорі. Розглянемо основні методи і підходи.

Зіставлення ознак – це процес пошуку релевантних ключових точок між двома зображеннями. Вона дозволяє знаходити схожі об'єкти або сцени на різних зображеннях і широко використовується в комп'ютерному зорі для таких завдань, як зшивання зображень, розпізнавання об'єктів, доповнена реальність та інші. Спочатку на кожному зображенні виділяються спеціальні точки, які називаються ключовими точками або дескрипторами за допомогою алгоритмів SIFT, SURF, ORB або AKAZE. Це можуть бути кути, межі або інші ділянки, які можна легко визначити і описати. Для кожної ключової точки розраховується дескриптор – математичний опис, що характеризує навколишнє середовище. Дескриптори повинні бути інваріантними до обертання, масштабу та

освітлення. Дескриптори з двох зображень порівнюються, щоб знайти пари найбільш схожих ключових точок. Як правило, для цього використовується евклідова відстань між дескрипторами, а пари з найменшою відстанню вважаються співпадаючими. Помилкові збіги відфільтровуються за допомогою RANSAC або інших методів.

Бібліотеки комп'ютерного зору, такі як OpenCV, часто використовуються для зіставлення функцій. OpenCV надає інструменти для виявлення ознак, розрахунку дескрипторів та зіставлення функцій. Існують також методи зіставлення функцій на основі глибокого навчання.

Реєстрація зображення — це процес геометричного вирівнювання кількох наборів даних таким чином, щоб можна було порівнювати відповідні пікселі, що представляють одну й ту саму сцену. Дані можуть надходити з різних датчиків, у різний час, під різними кутами огляду або навіть представляти різні типи зображень (наприклад, оптичні та рентгенівські). Захоплення зображень є ключовим етапом у багатьох програмах, особливо в біомедичній візуалізації та комп'ютерному зорі. Він дозволяє поєднувати інформацію з різних джерел, наприклад, об'єднувати дані з кількох камер для створення панорамного зображення або поєднувати дані з різних датчиків для отримання більш повної інформації про об'єкт. Також він дозволяє порівнювати зображення одного і того ж об'єкта в різний час і аналізувати зображення в єдиній системі координат. Це дає можливість стежити за змінами, наприклад, в рості пухлини або деформації структури. Процес реєстрації зображень зазвичай включає в себе наступні етапи.

- Вибирається базове зображення або система координат, до якої будуть зведені інші зображення.
- У кожному зображенні шукаються характерні точки, риси або об'єкти, які можна порівняти між собою.
- На основі знайдених збігів обчислюється перетворення, яке необхідно застосувати до одного або декількох зображень, щоб вирівняти їх з базовим зображенням.
- Обчислене перетворення застосовується до зображень для приведення їх у єдину систему координат.
- Точність вирівнювання оцінюється, щоб переконатися, що реєстрація пройшла успішно.

Найбільш підходящим для завдань розпізнавання об'єктів є Multi-view Reconstruction, у вигляді техніки Structure from motion (SfM). Це техніка смугового зображення, це процес побудови тривимірної структури з послідовності двовимірних зображень, які можна поєднувати з локальними сигналами руху. Структура з руху відноситься до явища, за допомогою якого люди і тварини можуть реконструювати тривимірну структуру з двовимірних проєкцій на сітківку ока слідів руху від рухомих об'єктів або сцен. Багато інформації про просторову структуру об'єктів навколишнього середовища людина сприймає при пересуванні по ньому. У міру того, як спостерігач рухається і об'єкти переміщуються навколо нього, інформація отримується з сприйнятих зображень протягом тривалого часу. Реконструкція структури рухомих об'єктів –

завдання, аналогічне реконструкції структури зі стереоскопічних зображень. І в тому, і в іншому випадку необхідно знайти збіг між зображеннями і реконструювати тривимірний об'єкт.

Щоб знайти збіг між зображеннями, на них відстежують такі об'єкти, як кутові точки (грані з градієнтом в різні боки). Одним з найбільш широко використовуваних алгоритмів пошуку ознак є алгоритм SIFT (масштабно-інваріантне перетворення ознак). Як особливість він використовує максимуми піраміди гаусових різниць. Першим кроком алгоритму SIFT є знаходження домінуючого напрямку градієнта. Для того щоб зробити цей варіант обертання, рукоятку повертають таким чином, щоб вона збігалася з заданою орієнтацією. Іншим поширеним алгоритмом вилучення ознак є SURF (Speeded Up Robust Features). В алгоритмі SURF гаусові різниці замінюються операцією вибору областей на основі матриці Гессе. Крім того, замість підрахунку градієнтних гістограм SURF проводить розрахунки на основі сум компонент градієнта та сум їх абсолютних значень. Потім порівнюються функції, виділені на всіх зображеннях. Іноді деякі з порівнянних ознак не збігаються належним чином, тому знайдені результати потрібно відфільтрувати. Як правило, алгоритм RANSAC (Random Sample Consensus) використовується для усунення відхилень у відповідності. У [14] RANSAC використовується для вирішення проблеми визначення місця розташування (LDP), в якій метою є визначення точок у просторі, спроектованих на зображення на набір орієнтирів з відомими положеннями.

Траєкторії вибраних елементів зображення, які рухаються в часі, використовуються для реконструкції їх положення в тривимірному просторі і руху камери. Альтернативою є так звані прямі підходи, де геометрична інформація (тривимірна структура та рух камери) визначається за напрямком зображення, без проміжної абстракції до особливостей або ракурсів.

Існує кілька підходів до отримання конструкції шляхом руху. У поступовій структурі руху положення камери вирішуються і додаються до колекції по порядку. У глобальній структурі руху всі положення камер вирішуються одночасно. Деякі проміжним підходом є зовнішня структура руху пам'яті, в якій деякі часткові реконструкції обчислюються, а потім інтегруються в глобальне рішення.

Для первинної обробки знімків із дронів застосовують спеціалізоване ПЗ, таке як Pix4D, Agisoft, PhotoScan, Inpho та ін. Воно зрівнює всі знімки в блоці, обчислює елементи їх орієнтування та створює ортофотоплан. Digitals дозволяє використовувати як ортофотоплан для збирання даних у режимі моно, так і первинні знімки для створення цифрових карт та планів у стереорежимі. Для цього потрібно мати модуль Delta/Stereo Digitals та відповідне обладнання (стереоскоп або 3D-монітор з затворними чи пасивними окулярами).

Математична модель польоту БПЛА за допомогою системи комп'ютерного зору виглядає наступним чином [15, 16]. Безпілотний літальний апарат моделюється рухомим ортонормованим репером  $Se'_1e'_2e'_3$ , в початковій точці якого знаходиться точкова фотокамера  $C(X_c, Y_c, Z_c)$ , що задає положення БПЛА у світовій системі  $P(X, Y, Z)$  підстилаючого рельєфу. Фотокамера жорстко закріплена на БПЛА, що рухається, її го-

ловний оптичний промінь  $l$  протилежно спрямований вектору  $e'_3$ . Процес фотографування є перспективною проекцією опорних точок на площину польоту в момент часу  $t$  і лінійне перетворення метричної системи координат отриманих проекцій точок у піксельну  ${}^P P(x, y)$  на знімку  $I(t)$ . Перспективна проекція - це лінійне відображення, яке є центральною композицією з центром в точці  $C$  однорідної гомотетії на передню площину зображення і проектування на площину польоту.

Матриця орієнтації БПЛА – це матриця переходу  $R$  від нерухомого (світового) репера  $Ce_1e_2e_3$  до рухомого  $Ce'_1e'_2e'_3$

$$e'_k = \sum_{i=1}^3 r_{ki} e_i, \quad k = \overline{1,3}, \quad R = (r_{ij})_{i,j=\overline{1,3}}.$$

Тоді математична модель камери виглядає так:

$$\begin{pmatrix} \omega x \\ \omega y \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & a_x \\ 0 & f_y & a_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ -r_{21} & -r_{22} & -r_{23} \\ -r_{31} & -r_{32} & -r_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_c \\ Y - Y_c \\ Z - Z_c \end{pmatrix},$$

де  $f_x, f_y, a_x, a_y$  – параметри камери.

У картографії відома система фотограмметричних рівнянь, що дозволяє за відомими тривимірними координатами опорної точки  $P(X, Y, Z)$ , положенню фотокамери  $C(X_c, Y_c, Z_c)$  образу  ${}^P P(x, y)$  опорної точки та наносити опорну точку на карту. З математичної моделі камери виводиться система фотограмметричних рівнянь

$$x = -f_x \frac{r_{11}(X - X_c) + r_{12}(Y - Y_c) + r_{13}(Z - Z_c)}{r_{31}(X - X_c) + r_{32}(Y - Y_c) + r_{33}(Z - Z_c)} + a_x,$$

$$y = -f_y \frac{r_{21}(X - X_c) + r_{22}(Y - Y_c) + r_{23}(Z - Z_c)}{r_{31}(X - X_c) + r_{32}(Y - Y_c) + r_{33}(Z - Z_c)} + a_y.$$

Матрицю орієнтації БПЛА можна поставити, використовуючи кути Ейлера, а саме

$$R(\alpha, \beta, \delta) = R_\delta^{Z''} R_\beta^{X'} R_\alpha^Z =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \delta & 0 \\ -\sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \sin \beta \\ 0 & -\sin \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

де  $\alpha \in [0, 2\pi)$ ,  $\beta \in [0, \pi/2)$ ,  $\delta \in [0, 2\pi)$ .

Систему фотограмметричних рівнянь можна використовувати для розв'язання задачі автономного позиціонування БПЛА. Розглядається фото потік, на кожному кадрі якого є зображення відомих опорних точок рельєфу, що підстилає. Як матриця орієнтації БПЛА розглядається остання матриця. Тоді, якщо вимагати, щоб у момент зйомки фотокамера спостерігала не менше трьох опорних точок підстилаючого рельєфу і фотографувала їх, то можна побудувати систему рівнянь щодо шуканих величин  $C(X_c, Y_c, Z_c)$ ,  $\alpha, \beta, \delta$ :

$$x_i = -f_x \frac{r_{11}(X_i - Xc) + r_{12}(Y_i - Yc) + r_{13}(Z_i - Zc)}{r_{31}(X_i - Xc) + r_{32}(Y_i - Yc) + r_{33}(Z_i - Zc)} + a_x,$$
$$y_i = -f_y \frac{r_{21}(X_i - Xc) + r_{22}(Y_i - Yc) + r_{23}(Z_i - Zc)}{r_{31}(X_i - Xc) + r_{32}(Y_i - Yc) + r_{33}(Z_i - Zc)} + a_y.$$

де  $r_{ij} = r_{ij}(\alpha, \beta, \delta)$ ,  $i, j = 1, 2, 3$ .

Таким чином можемо сформулювати методологію об'єднання даних багатоканальних аерокосмічних зображень, що полягає у послідовному застосуванні до зображень наведеної на рис. 1 схеми та подальшої обробки їх за методикою SIFT. На рис. 2 наведено приклад обробки зображення з камери дрону за запропонованою методологією.

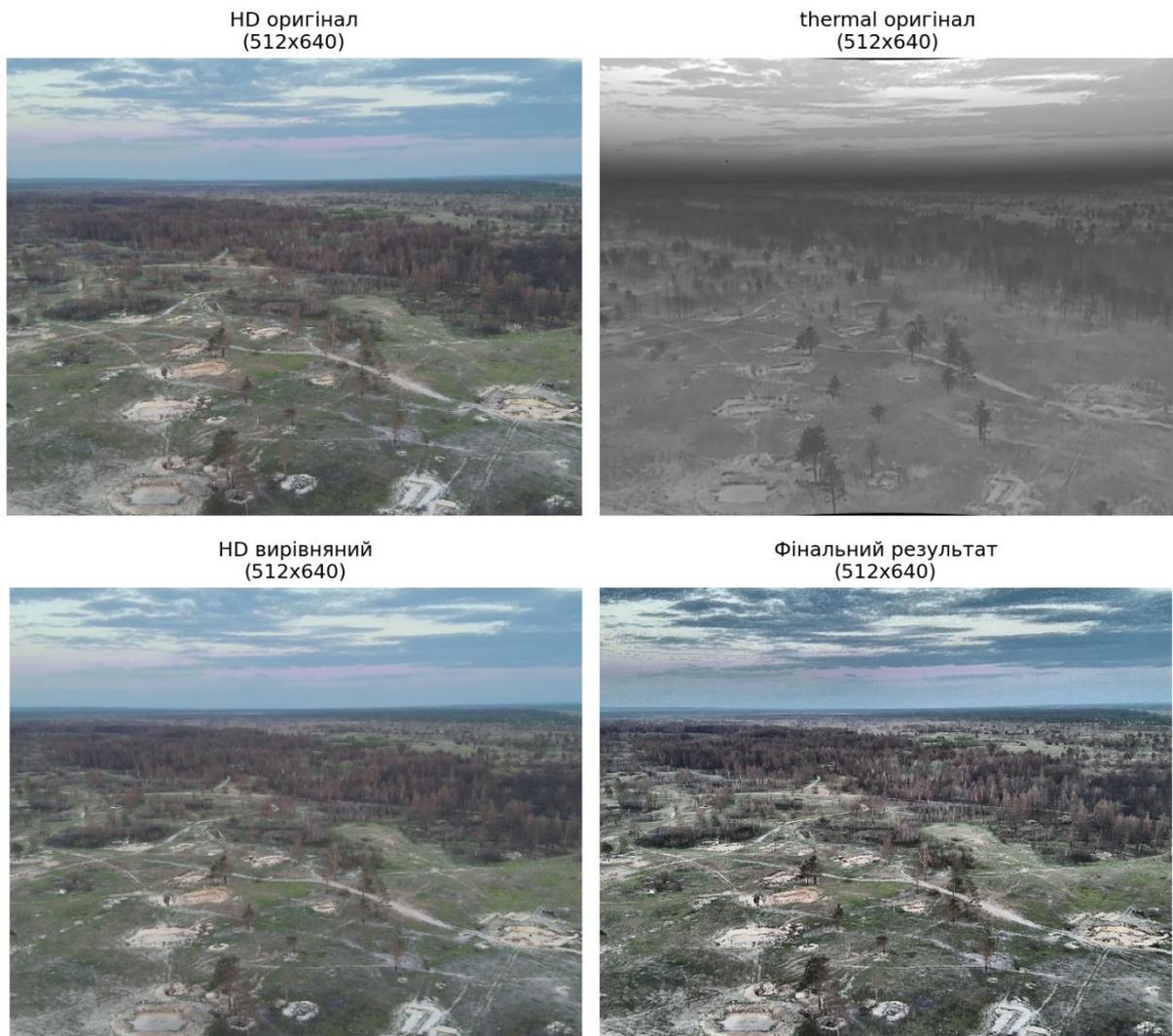


Рисунок 2 – Результати обробки БКЗ

Результати тестування свідчать, що первинне зображення суттєво поліпшено і контури технічних об'єктів виділені більш чітко. Як видно з рис. 3, запропонований метод дійсно підвищує інформативність мультиспектрального зображення.

**Висновки.** В статті розроблені та вдосконалені методики об'єднання багатоканальних зображень, що дозволяє покращити точність аналізу, підвищити інформативність та уникнути головної частини впливу шумів. Запропонована методика базується на використанні математичних моделей для гармонізації різнорідних даних і включає попередній препроцесинг, спектральний аналіз та машинне навчання. Підходи адаптовано для об'єднання даних дистанційного зондування Землі. Проведені експерименти демонструють підвищення якості результатів при використанні запропонованого підходу.

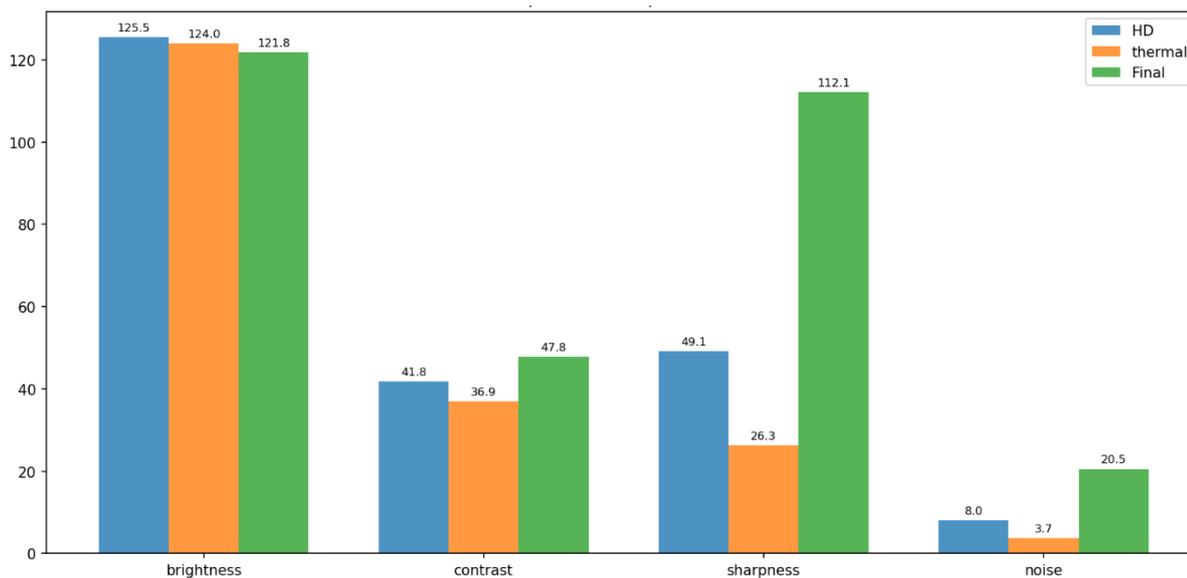


Рисунок 3 – Порівняння метрик якості

Отримані результати підтверджують, що інтеграція багатоканальних зображень дозволяє досягти кращої деталізації, зменшити помилки ідентифікації об'єктів та забезпечити більш точну візуалізацію. Розроблена методологія є універсальною та може бути застосована в багатьох галузях, включаючи екологічний моніторинг, планування міських територій, медичну діагностику та робототехніку.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. (2018). Digital Image Processing. 4th Edition, Pearson Education, New York, 1022 p. ISBN 10: 1-292-22304-9
2. Richards, J. A., & Jia, X. (2020). Remote Sensing Digital Image Analysis. Springer, 363 p. DOI:10.1007/978-3-642-30062-2
3. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*. Vol 521. pp. 436-444. DOI:10.1038/nature14539
4. Jain, A. K. (1989). Fundamentals of Digital Image Processing. Prentice-Hall. 565 p. ISBN 0-13-336165-9
5. Balakrishnan, R. and Priya, R. (2018). Multimodal Medical Image Fusion Using Various Hybrid Fusion Techniques for Clinical Treatment Analysis. *Smart Construction Research*. Vol 2. pp. 1–20. DOI:10.18063/scr.v2i4.594
6. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Bio-

medical Image Segmentation. In: Navab, N., Hornegger, J., Wells, W., Frangi, A. (eds) Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. MICCAI 2015. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol 9351. Springer, Cham, pp. 234–241. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28).

7. Hartley, R. and Zisserman, A. (2003). *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Cambridge University Press. 655 p. ISBN 0-521-54051-8.

8. Faugeras, O., Luong, Q.-T., and Papadopoulos, T. (2001). *The Geometry of Multiple Images*. MIT Press, London. 644 p. ISBN 0-262-06220-8.

9. Ma, Y., Sastry, S., Kosecka, J., Soatto, S. (2003). An Invitation to 3-D Vision: From Images to Geometric Models. *Interdisciplinary Applied Mathematics Series*, No 26, pp. 1-325. Springer-Verlag New York, LLC. ISBN 0-387-00893-4

10. Shapiro, L., Stockman, G. (2001). *Computer Vision*. Prentice Hall. 580 p. ISBN 0-13-030796-3.

11. Lowe, D. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*. Vol 60, pp. 91-110.

DOI:10.1023/B%3AVISI.0000029664.99615.94

12. Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L. (2006). SURF: Speeded up robust features. *Computer Vision-ECCV 2006*. Vol 3951, pp. 404-417. DOI:10.1007/11744023\_32

13. Olevskiy, V., Olevska, Yu., Olevskiy, O., and Hnatushenko, V. (2023). Raster image processing using 2D Padé-type approximations. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol 2675, paper 012015. DOI 10.1088/1742-6596/2675/1/012015

14. Fischler, M. A., Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, Vol 24(6), pp. 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>

15. Dubins L. E. On curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. *American Journal of Mathematics*, 1957. Vol. 79, no. 3, pp. 497–516.

<https://www.jstor.org/stable/2372560?origin=crossref>

16. Babaei A., Mortazavi M. Three-Dimensional Curvature-Constrained Trajectory Planning Based on In-Flight Waypoints. *Journal of Aircraft*, 2010. Vol. 47, no. 4, pp. 1391-1398. <https://doi.org/10.2514/1.47711>

## REFERENCES

1. Gonzalez, R.C. and Woods, R.E. (2018). *Digital Image Processing*. 4th Edition, Pearson Education, New York, 1022 p. ISBN 10: 1-292-22304-9

2. Richards, J. A., & Jia, X. (2020). *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer, 363 p. DOI:10.1007/978-3-642-30062-2

3. LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*. Vol 521. pp. 436-444. DOI:10.1038/nature14539

4. Jain, A. K. (1989). *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice-Hall. 565 p. ISBN 0-13-336165-9

5. Balakrishnan, R. and Priya, R. (2018). Multimodal Medical Image Fusion Using Various Hybrid Fusion Techniques for Clinical Treatment Analysis. *Smart Construction Research*.

Vol 2. pp. 1–20. DOI:10.18063/scr.v2i4.594

6. Ronneberger, O., Fischer, P., Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In: Navab, N., Hornegger, J., Wells, W., Frangi, A. (eds) Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. MICCAI 2015. *Lecture Notes in Computer Science*, Vol 9351. Springer, Cham, pp. 234–241. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28).

7. Hartley, R. and Zisserman, A. (2003). Multiple View Geometry in Computer Vision. Cambridge University Press. 655 p. ISBN 0-521-54051-8.

8. Faugeras, O., Luong, Q.-T., and Papadopoulos, T. (2001). The Geometry of Multiple Images. MIT Press, London. 644 p. ISBN 0-262-06220-8.

9. Ma, Y., Sastry, S., Kosecka, J., Soatto, S. (2003). An Invitation to 3-D Vision: From Images to Geometric Models. *Interdisciplinary Applied Mathematics Series*, No 26, pp. 1-325. Springer-Verlag New York, LLC. ISBN 0-387-00893-4

10. Shapiro, L., Stockman, G. (2001). Computer Vision. Prentice Hall. 580 p. ISBN 0-13-030796-3.

11. Lowe, D. (2004). Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints. *International Journal of Computer Vision*. Vol 60, pp. 91-110.

DOI:10.1023/B%3AVISI.0000029664.99615.94

12. Bay, H., Tuytelaars, T., Van Gool, L. (2006). SURF: Speeded up robust features. Computer Vision-ECCV 2006. Vol 3951, pp. 404-417. DOI:10.1007/11744023\_32

13. Olevskiy, V., Olevska, Yu., Olevskiy, O., and Hnatushenko, V. (2023). Raster image processing using 2D Padé-type approximations. *Journal of Physics: Conference Series*. Vol 2675, paper 012015. DOI 10.1088/1742-6596/2675/1/012015

14. Fischler, M. A., Bolles, R. C. (1981). Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, Vol 24(6), pp. 381–395. <https://doi.org/10.1145/358669.358692>

15. Dubins L. E. On curves of Minimal Length with a Constraint on Average Curvature, and with Prescribed Initial and Terminal Positions and Tangents. *American Journal of Mathematics*, 1957. Vol. 79, no. 3, pp. 497–516.

<https://www.jstor.org/stable/2372560?origin=crossref>

16. Babaei A., Mortazavi M. Three-Dimensional Curvature-Constrained Trajectory Planning Based on In-Flight Waypoints. *Journal of Aircraft*, 2010. Vol. 47, no. 4, pp. 1391-1398. <https://doi.org/10.2514/1.47711>

Received 30.09.2025.  
Accepted 06.10.2025.

**Methodology for data fusion of multichannel images**

*Relevance of the research topic. In modern research and practical application of multi-channel images obtained from various sources, such as aerospace sensors and medical imaging systems, there is a need for effective data fusion. In the aerospace industry, combining images with different spectral characteristics provides more accurate information about Earth's surface. In the medical field, integrating images of different modalities helps improve diagnostic accuracy. However, these processes are complicated by differences in spatial resolution, scale, spectral ranges, and noise characteristics of the data.*

*Problem statement. It is necessary to develop a method for combining images with different spectral characteristics to obtain more accurate information about the Earth's surface and medical objects.*

*Research goal and methods. The goal is to develop and improve a method for combining multi-channel images to improve the accuracy of analysis, increase information content and reduce the impact of noise. The proposed method is based on the use of mathematical models for harmonizing heterogeneous data, including algorithms for preliminary preprocessing, spectral analysis and machine learning. The adaptation of approaches for specific tasks is considered: combining remote sensing data of the Earth for cartographic analysis and merging medical images of different modalities (for example, MRI, CT and ultrasound) for diagnostic purposes.*

*Results and key conclusions. The developed methodology is universal and can be applied in many areas, including environmental monitoring, urban planning, medical diagnostics, and robotics. The proposed methodology is based on the use of mathematical models to harmonize heterogeneous data and includes preliminary preprocessing, spectral analysis and machine learning. The approaches are adapted for combining remote sensing data of the Earth and fusing medical images for diagnostic purposes. The experiments conducted demonstrate an increase in the quality of the results when using the proposed approach. The results obtained confirm that the integration of multi-channel images allows us to achieve better detail, reduce object identification errors and provide more accurate visualization. The developed methodology is universal and can be applied in many areas, including environmental monitoring, urban planning, medical diagnostics and robotics.*

*Keywords: multichannel images, preprocessing, spectral analysis, machine learning.*

**Гнатушенко Володимир Володимирович** – д-р. техн. наук, професор, завідувач кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3140-3788>

**Гришак Володимир Володимирович** – канд. фіз.-мат. наук, докторант кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8956-8468>

**Олевська Юлія Борисівна** – канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри прикладної математики, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1901-4333>

**Олевський Віктор Ісаакович** – д-р. техн. наук, професор, професор кафедри інформаційних технологій та комп'ютерної інженерії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3824-1013>

**Удовик Ірина Михайлівна** – канд. техн. наук, доцент, декан факультету інформаційних технологій, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5190-841X>

**Volodymyr Hnatushenko** – D.Sc., professor, head of the Information Technology and Computer Engineering Department, Dnipro University of Technology, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3140-3788>

**Dmytro Hryshchak** – Ph.D., doctorant of the Information Technology and Computer Engineering Department, Dnipro University of Technology, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8956-8468>

**Yuliia Olevska** – Ph.D., associate professor, associate professor of the Applied Mathematics Department, Dnipro University of Technology, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1901-4333>

**Viktor Olevskiy** – D.Sc., professor, professor of the Information Technology and Computer Engineering Department, Dnipro University of Technology, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3824-1013>

**Iryna Udovyk** – Ph.D., Associate Professor, Dean of the Faculty of Information Technology, National Technical University "Dnipro Polytechnic", ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5190-841X>

## КЕРУВАННЯ СТАБІЛІЗАЦІЄЮ НАПРУГИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В ДЖЕРЕЛАХ АЛЬТЕРНАТИВНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

*Анотація:* У роботі розроблено структурні та функціональні схеми конструювання цифрового контуру керування стабілізацією напруги постійного струму, що може визначати та регулювати рівні напруги для забезпечення достатньо стабільного виходу, а також контролювати вихідну напругу за допомогою зворотного зв'язку, що дозволяє усунути температурний і часовий дрейф параметрів, характерний для аналогових схем і є предметом сучасних досліджень. Проведено імітаційне моделювання впливу параметрів ЦАП зі струмовим виходом на роботу запропонованих схем цифрового контуру управління стабілізації напруги постійного струму у середовищі Multisim. Технічні рішення, що представлені у роботі дозволяють відмовитися від підсилювача напруги в схемах перетворювачів за рахунок використання ЦАП із струмовим виходом та суматором струму.

*Ключові слова:* АЦП, ЦАП, цифровий контур управління, регулюючий елемент, напруга керування, бінарний код, матриця  $R-2R$ , вагові резистори.

**Постановка проблеми.** З розвитком джерел альтернативної енергетики великого розширення набули системи стабілізації напруги постійного струму, що використовуються в різних силових електронних пристроях і надають низку переваг, таких як зменшення розміру та ваги, можливість забезпечувати високу гнучкість, адаптивність та ефективність у використанні. При динамічному перемиканні різних перетворювачів постійного струму в більшості призводить до зміни лінійних характеристик мереж постійного струму. Отже при регулюванні вихідної напруги перетворювачів постійного струму велика увага приділяється вибору методів контролю та керування.

В свою чергу перетворювачі постійного струму, в залежності від принципу дії, поділяються на імпульсні та лінійні. В конструюванні подібних джерел розробники віддають перевагу імпульсним перетворювачам напруги, оскільки в порівнянні з лінійними, мають незаперечні і дуже вагомі переваги – це високий ККД, і, як наслідок, низьке тепловиділення, а також малу вагу і невеликі габарити. [1, 9]. Проте перетворювачі з лінійним керуванням мають простішу схему і менший рівень нелінійних спотворень та немає необхідності використовувати фільтри з великою вибірністю. [1, 9]. З технічних міркувань при поєднанні лінійного та імпульсного способу стабілізації напруги з використанням цифрового контуру керування можна досягти значно кращих характеристик за інші схеми стабілізації постійної напруги.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні імпульсні джерела живлення являють собою досить складні і ретельно розраховані системи стабілізації із зворотними зв'язками. В роботах [1, 2, 12] розглядаються різні методи керування імпульсними перетворювачами постійної напруги, зокрема керування за напругою VMC, керування за струмом СМС, пропорційно-інтегрально-диференціальне керування PID, ковзне керування SM та керування з нечіткою логікою FLC.

Зміни напруги призводять до тимчасового або постійного виходу з ладу навантаження. Через неконтрольовану низьку або високу напругу скорочується термін служби приладів електронних систем та мереж. Коливання напруги виникають через непередбачені зміни навантаження або проблеми в енергосистемі. Використання технології стабілізації напруги постійного струму з цифровою схемою керування та силовими електронними пристроями при проектуванні інтелектуальних перетворювачів призводить до забезпечення стабільної напруги на постійному навантаженні [4].

Класичні лінійні перетворювачі зазвичай використовуються в контролерах перетворювачів постійного струму [9]. Однак через нелінійну особливість систем, методи лінійного керування можуть гарантувати лише стабільність сигналу, а при великих збуреннях неефективні для змін навантаження. У [9], [10] адаптивне зворотне керування використовується для оцінки невизначених змін постійного навантаження потужності при швидкій динамічній реакції, що призводить до швидкого та точного відстеження напруги постійного струму при високих змінах навантаження. Основними перевагами зворотного керування є систематична структура для проектування перетворювача, легкість розуміння, проста продуктивність, невідповідності лінійних параметрів, невідповідності та успішне виключення невизначеності. Адаптивне зворотне керування є одним з найефективніших методів нелінійного синхронного керування для вирішення проблем стабільності та відстеження [3, 9].

Величина пульсацій вихідної напруги визначає електромагнітну сумісність джерел живлення з навантаженням. Електронні системи на основі цифрових елементів потребують менш стабільних параметрів живлення. Наприклад, цифрові мікросхеми потребують постійної напруги живлення з пульсаціями не більше 1%. Концепція стабілізації постійної напруги за допомогою цифрового контуру керування дозволяє усунути періодичні збурення, що множать частоту мережі. Пульсації напруги переносяться на вищі частоти, які визначаються зовнішнім генератором. Такі пульсації можна легко згладити за допомогою звичайного керамічного конденсатора [7].

**Мета дослідження:** Побудувати систему стабілізації напруги постійного струму з цифровим контуром управління з використанням струмового ЦАП.

Провести дослідження та моделювання запропонованих схем. Визначити вплив параметрів ЦАП зі струмовим виходом на роботу цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розробка цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму передбачає перехід до дискретних значень, що визначаються розрядністю лічильника та ЦАП зі струмовим виходом. Тому якість

вихідної напруги залежить не тільки від рівня вхідних пульсацій, але й від розрядності лічильника, ЦАП зі струмовим виходом та швидкодії АЦП.

В роботі [5] попередньо представлено приклад структурної схеми системи стабілізації постійної напруги з цифровим контуром керування. Структурна схема складається з цифрового контуру керування та елемента регулювання потужності. У такому контурі керуючий сигнал регулюючого елемента формується у вигляді двійкового коду, який перетворюється на аналоговий сигнал за допомогою ЦАП зі струмовим виходом, а для керування вихідною напругою використовується АЦП. Значення постійної напруги на навантаженні оцінюється цифровим контуром керування, порівнюється з заданим значенням та модифікує керуючий двійковий код таким чином, щоб за допомогою регулюючого елемента мінімізувати можливе відхилення вихідної напруги [10].

Практична реалізація такої системи стабілізації постійної напруги, у переважній більшості випадків, передбачає використання ЦАП на основі R-2R-матриці з вихідним сигналом у вигляді напруги, рівень якої визначається формулою 1:

$$V_{out} = \frac{V_{ref}}{2^n} D \quad (1)$$

де  $V_{ref}$  – величина опорної напруги;  $n$ -розрядність ЦАП;  $D$  – коефіцієнт який визначається від 0 до  $2^n - 1$  в залежності від вхідного двійкового коду.

При практичній реалізація такої системи стабілізації напруги, в даному випадку використовується ЦАП на основі двійково-зважених резисторів із вихідним сигналом у вигляді струму, рівень якого визначається формулою 2

$$\Sigma I = \frac{V_{ref}}{R} x_0 + \frac{V_{ref}}{2R} x_1 + \frac{V_{ref}}{4R} x_2 + \frac{V_{ref}}{8R} x_3 + \dots + \frac{V_{ref}}{2^n R} x_n \quad (2)$$

де  $V_{ref}$  – величина опорної напруги;  $n$ -розрядність ЦАП;  $x_n$  – значення двійкового коду, може набувати значень 0 або 1;  $R$  – опір першого розряду ЦАП.

Значення кроку квантування дорівнює градації вихідної напруги від наймолодшого розряду та визначається за формулою 3:

$$h = V_{ref} \frac{R_0}{2^n R} \quad (3)$$

Таким чином, рівень вихідного сигналу ЦАП не перевищує опорну напругу, що не є критичним, якщо вихідна напруга системи стабілізації постійної напруги не перевищує напругу живлення ЦАП (показано на рисунку 1а). В іншому випадку вихідного рівня ЦАП недостатньо для керування регулюючим елементом і необхідно використовувати додатковий підсилювач постійного струму (показано на рисунку 1б).

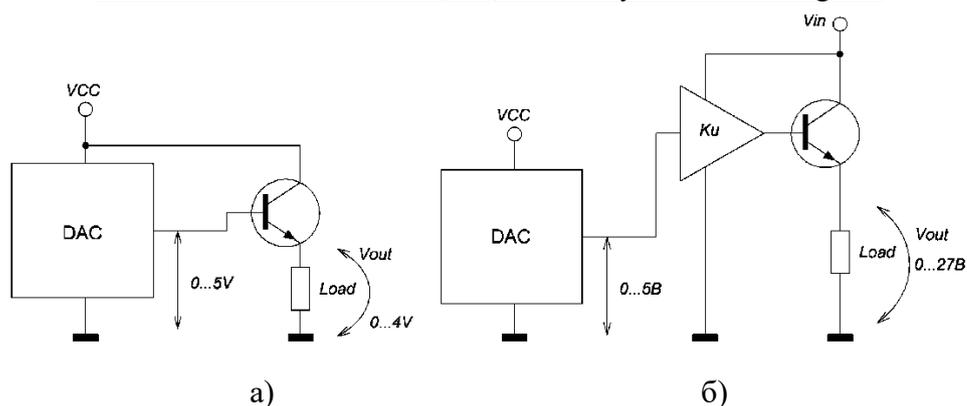


Рисунок 1 – Підключення ЦАП до регулюючого елемента:  
 а) без підсилювача; б) з підсилювачем

Такий підсилювач постійного струму повинен мати високу температурну стабільність та можливість лінійного підсилення вхідного сигналу з рівнем у кілька мілівольт, що зужує можливості вибору спеціалізованих мікросхем і, відповідно, збільшує їх вартість. У свою чергу, недоліком структури ЦАП зі зваженими резисторами є широкий діапазон значень опору резисторів, що служать для формування струмів розряду. Крім того, для забезпечення точності перетворення номінали резисторів повинні дотримуватися з прецизійною точністю.

Застосування у складі цифрової системи стабілізації напруги ЦАП із струмовим виходом на зважених резисторах дає можливість конструювати перетворювачі з вихідною напругою значно вищою ніж напруга живлення цифрової частини. На рисунку 2 наведена функціональна схема можливого варіанту такої системи стабілізації.

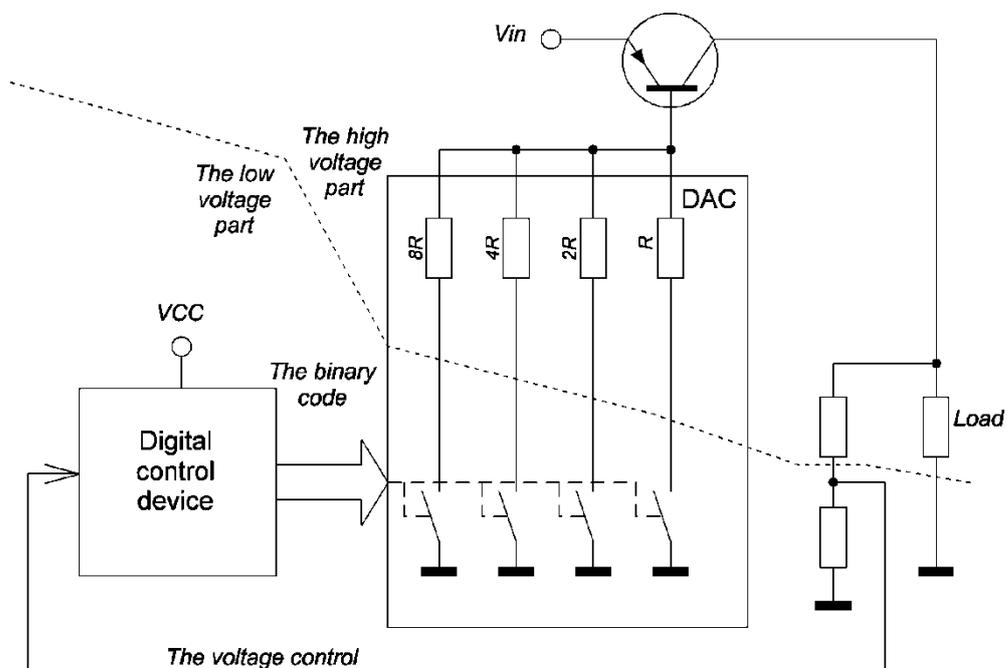


Рисунок 2 – Функціональна схема цифрового контуру стабілізації напруги на основі ЦАП із струмовим виходом

Схема працює таким чином. Цифровий пристрій керування (Digital control device) формує керуючий бінарний код (binary code), згідно з яким підключаються відповідні вагові резистори (DAC) і на виході ЦАП формується сигнал керування регулюючим транзистором – базовий струм, який підсилюється транзистором в  $h_{21E}$  раз, протікає через навантаження і створює відповідне падіння напруги. Контроль поточного значення напруги (voltage control) на навантаженні здійснюється через подільник, що знижує високу вихідну напругу до рівня безпечного для цифрової частини перетворювача. Вихідний струм такого ЦАП описується формулою 4:

$$\Sigma I = \frac{V_{ref}}{2R} x_0 + \frac{1}{2} \cdot \frac{V_{ref}}{2R} x_1 + \frac{1}{4} \cdot \frac{V_{ref}}{2R} x_2 + \frac{1}{8} \cdot \frac{V_{ref}}{2R} x_3 + \dots + \frac{1}{2^{n-1}} \cdot \frac{V_{ref}}{2^n R} x_n = \frac{V_{ref}}{2^n R} D. \quad (4)$$

Значення кроку квантування дорівнює градації вихідної напруги від наймолодшого розряду та визначається за формулою 5:

$$h = \frac{1}{2^{n-1}} V_{ref} \frac{R_0}{2R}. \quad (5)$$

Для даної схемної реалізації ЦАП опорна напруга рівна напрузі живлення за мінусом падіння напруги на переході база-емітер регулюючого транзистора.

Таким чином з'являється можливість будувати стабілізатори з вихідною напругою, яка обмежується зверху лише напругою пробною транзисторних ключів ЦАП.

На основі запропонованої концепції побудови цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму розроблена схема пристрою, результати дослідження якої в середовищі Multisim наведені на рисунку 3 [5]. В якості цифрового пристрою керування використаний ТТЛ реверсивний двійковий чотири розрядний лічильник 74193N із схемою реверсування підрахунку на логічних елементах [5]. ЦАП реалізований на польових транзисторних з ваговими резисторами, що працюють в ключовому режимі.

Однорозрядний АЦП побудований на операційному підсилювачі і стабілітроні для обмеження вихідного рівня до значення логічної одиниці ТТЛ логіки. Регулюючий елемент – біполярний транзистор структури р-п-р. Для контролю керуючого бінарного коду з виходу цифрового пристрою керування застосований HEX індикатор. Регулювання вихідного сигналу забезпечується зміною порогового рівня на вході операційного підсилювача потенціометром, який заживлюється від джерела стабільної опорної напруги.

На рисунку 4 наведена осцилограма вихідної напруги пристрою [10]. З осцилограми видно, що напруга на навантаженні після вмикання живлення ступінчасто (без викидів) зростає від нуля до визначеного значення і в подальшому відслідковується з певною пульсацією.

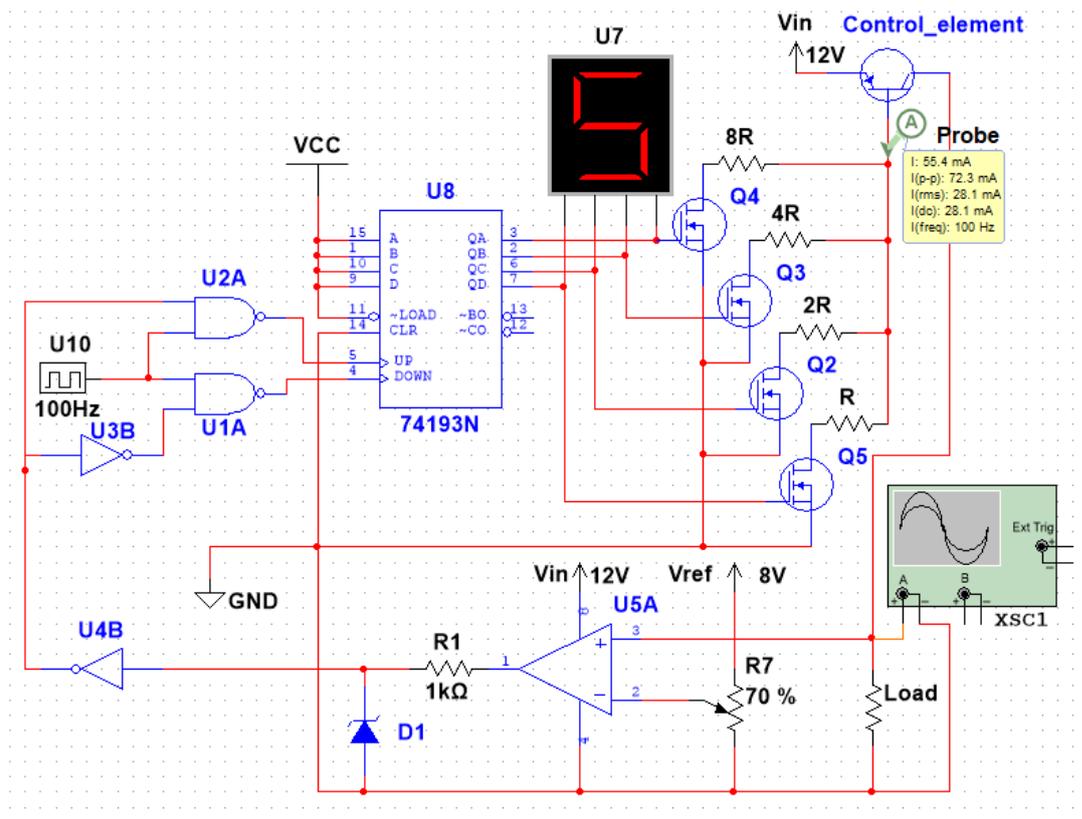


Рисунок 3 – Цифровий контур стабілізації напруги постійного струму на основі реверсивного лічильника

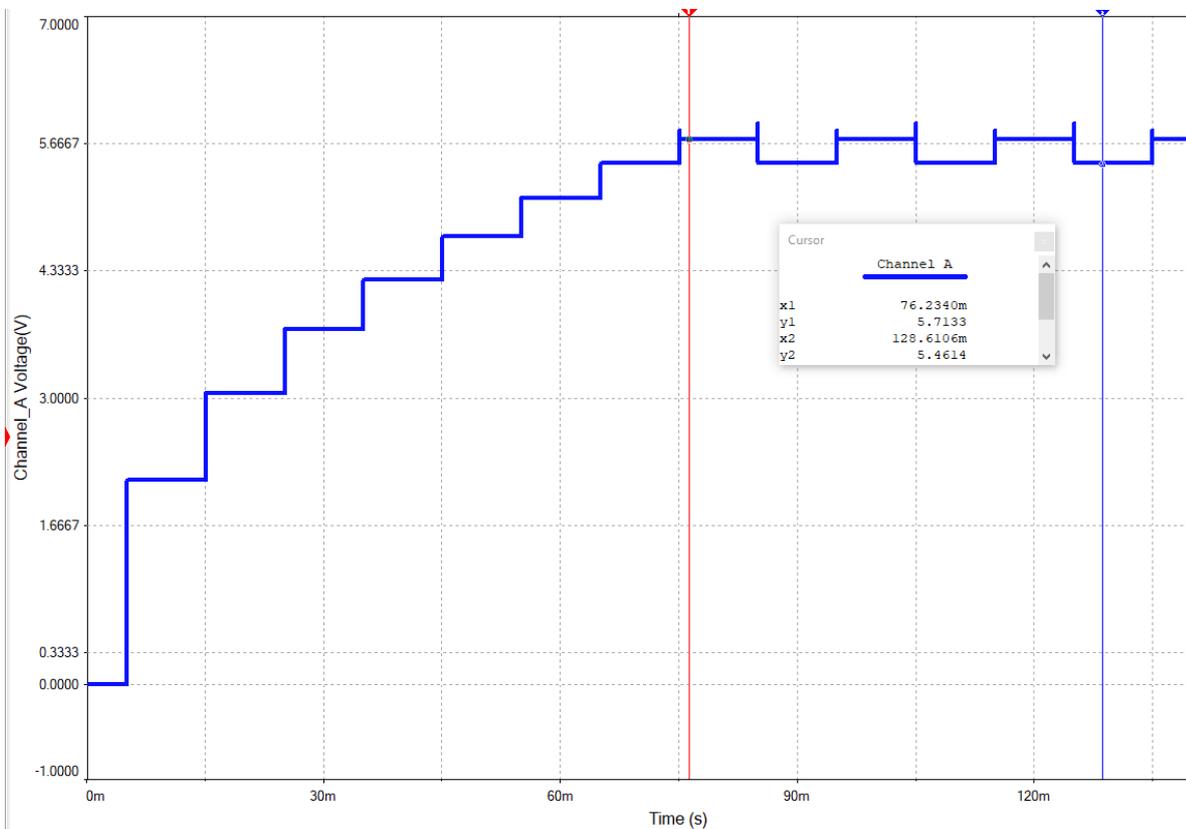


Рисунок 4 – Осцилограми напруги на навантаженні

Якщо обмежити напругу живлення системи стабілізації  $V_{in}$  рівнем 30В з'являється можливість в якості транзисторних ключів ЦАП використати буферні елементи ТТЛ 7406N – інвертори з відкритим колектором, максимальною робочою напругою 30В і вихідним струмом до 40мА [8].

На рисунку 5 наведені результати дослідження в середовищі Multisim модифікованої схеми цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму, де використані два реверсивних лічильники 74193N та вісім буферних елементів 7406N.

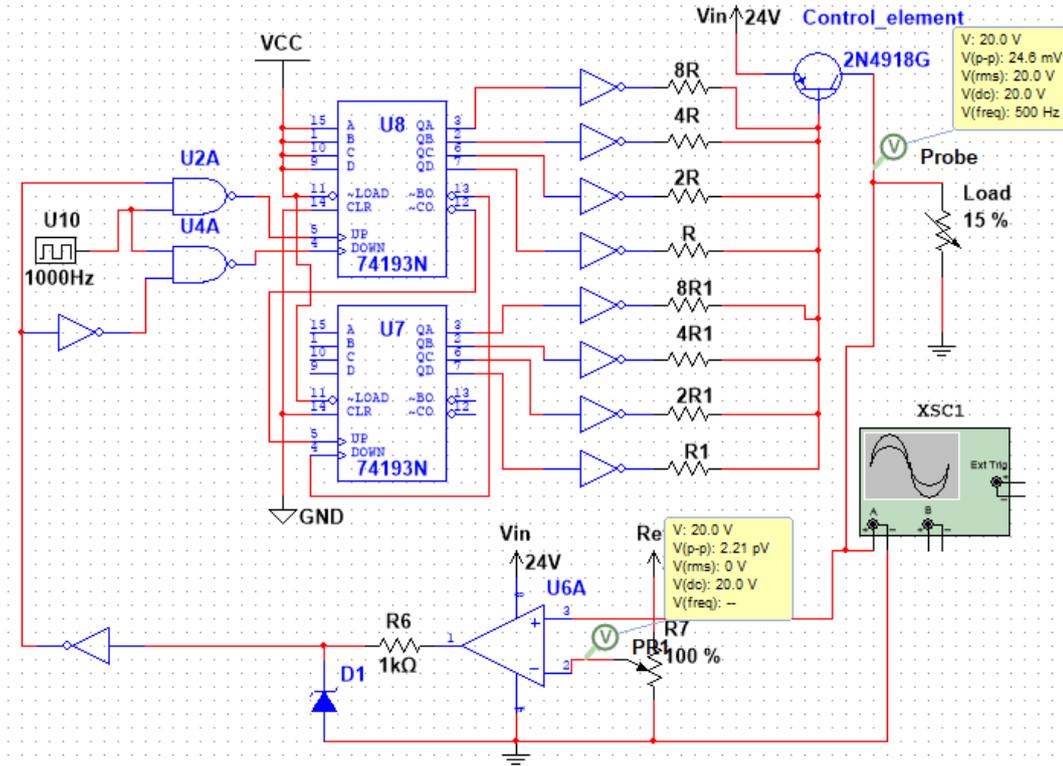


Рисунок 5 – Модифікована схема цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму на основі двох реверсивних лічильників

На рисунку 6 наведені осцилограми роботи модифікованої схеми цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму на фіксоване навантаження 15 Ом при різних значеннях вихідної напруги: 20 В, 16 В, 12 В, 4 В, 8 В.

Аналіз осцилограм вказує на явну не лінійність залежності «керуючий код-вихідна напруга», що обумовлено залежністю коефіцієнту підсилення базового струму регулюючого транзистора 2N4918G від струму колектору. Як видно із залежності при зростанні струму колектору від 15 мА до 1500 мА коефіцієнт передачі  $h_{FE}$  знижується від 150 до 18. [14].

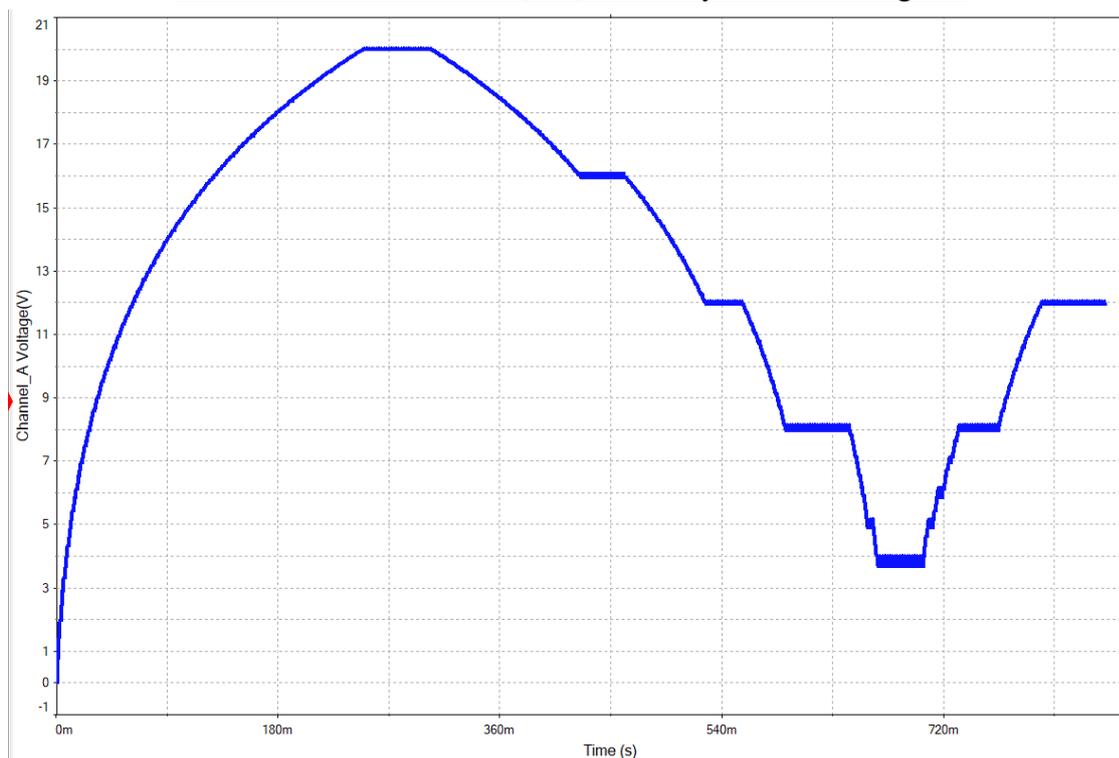


Рисунок 6 – Осцилограми вихідної напруги модифікованої схеми цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму

Продемонстрована на рисунках 3 та 5 реалізація функціональної схеми цифрового контуру стабілізації напруги постійного струму на основі ЦАП із струмовим виходом використовує напругу живлення  $V_{in}$  за мінусом падіння напруги на переході баз-емітер регулюючого транзистора в якості опорної напруги. Таким чином, при коливанні (пульсаціях) напруги живлення  $V_{in}$  і зафіксованому коді на виході цифрового контуру керування відбувається модуляція вихідного струму ЦАП, що є керуючим сигналом для регулюючого транзистора та проявляється у вигляді додаткових пульсацій напруги на навантаженні.

На рисунку 7 наведена схема моделювання впливу коливання напруги живлення на пульсації вихідної напруги.

Умови моделювання: напруга живлення  $V_{in}=24$  В, форма пульсації синусоїдальна (Рисунок 8), амплітуда пульсацій 2 В, частота 50 Гц, частота тактового генератора 1000 Гц і 100 кГц (відношення частоти пульсацій на навантаженні до частоти пульсацій напруги живлення 1:10, 1:100 і 1:1000), вихідна напруга стабілізатора 12 В. На рисунках 8-10 наведені осцилограми напруги на навантаженні при різному відношенні тактової частоти генератора до частоти пульсацій напруги живлення.

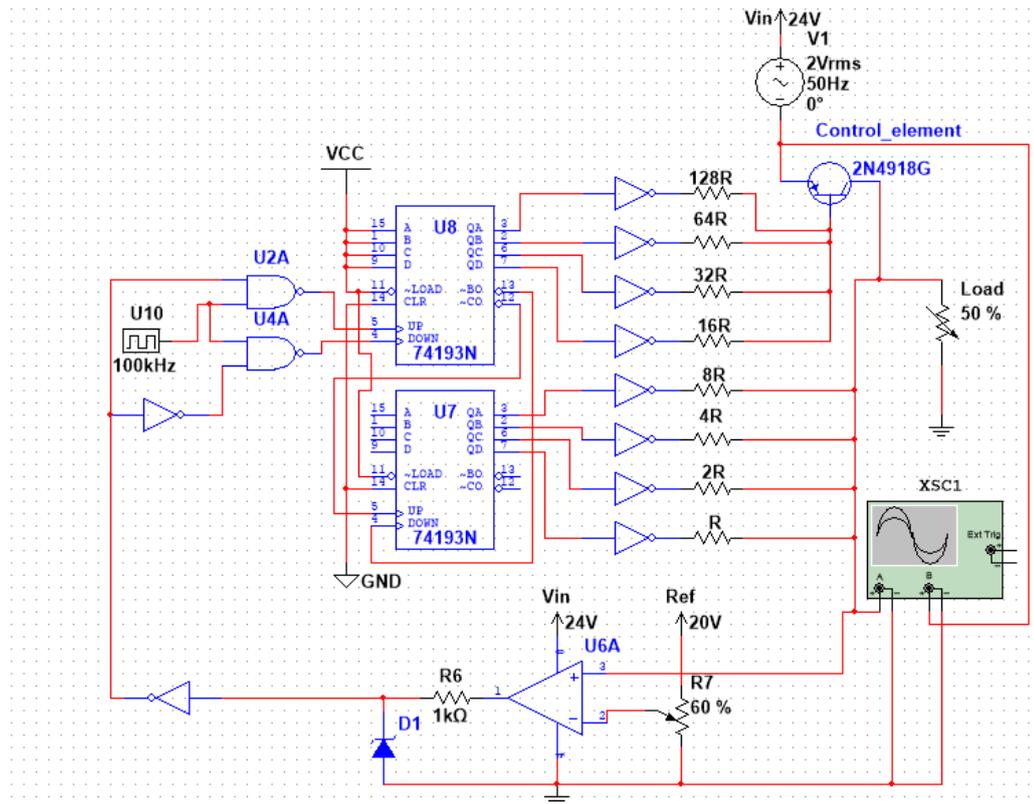


Рисунок 7 - Схема моделювання впливу пульсації напруги живлення на вихідну напругу

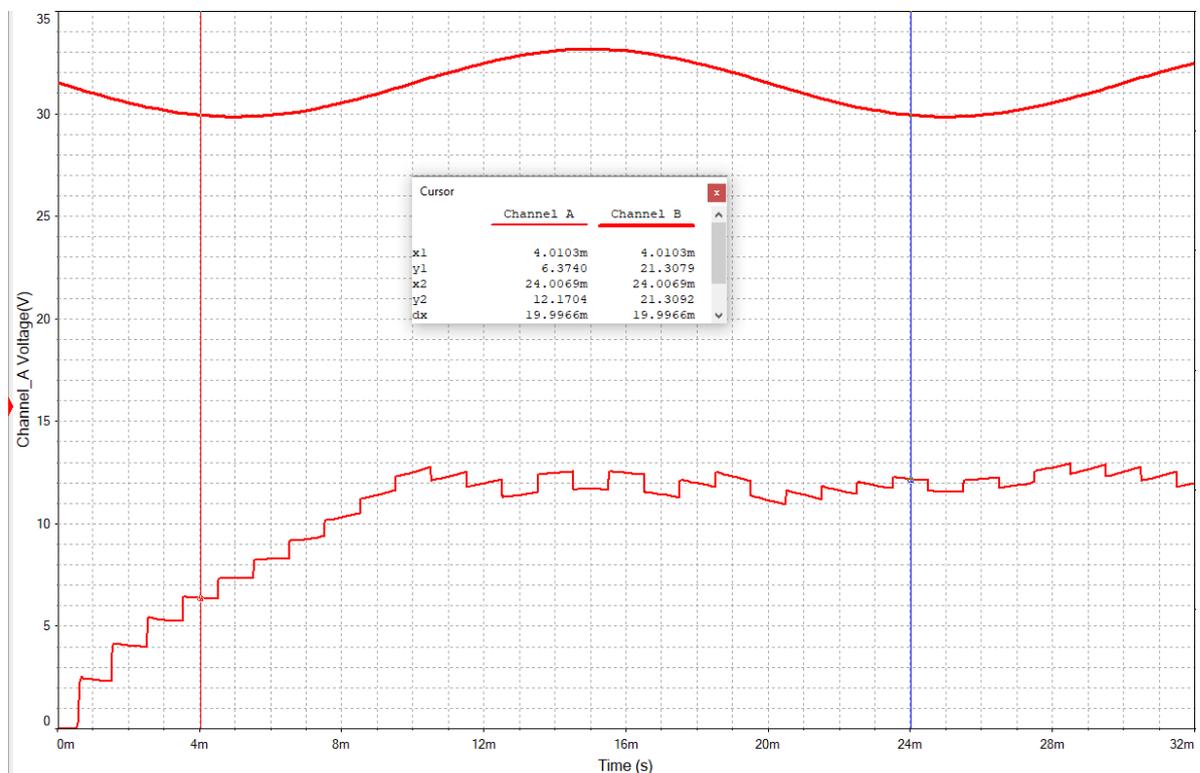


Рисунок 8 – Результати дослідження впливу пульсацій вхідної напруги на напругу навантаження ( $V_{in}$  з пульсаціями 2 В;  $V_{load}=12$  В;  $F_{in}:F_{ul0}=1:10$ )

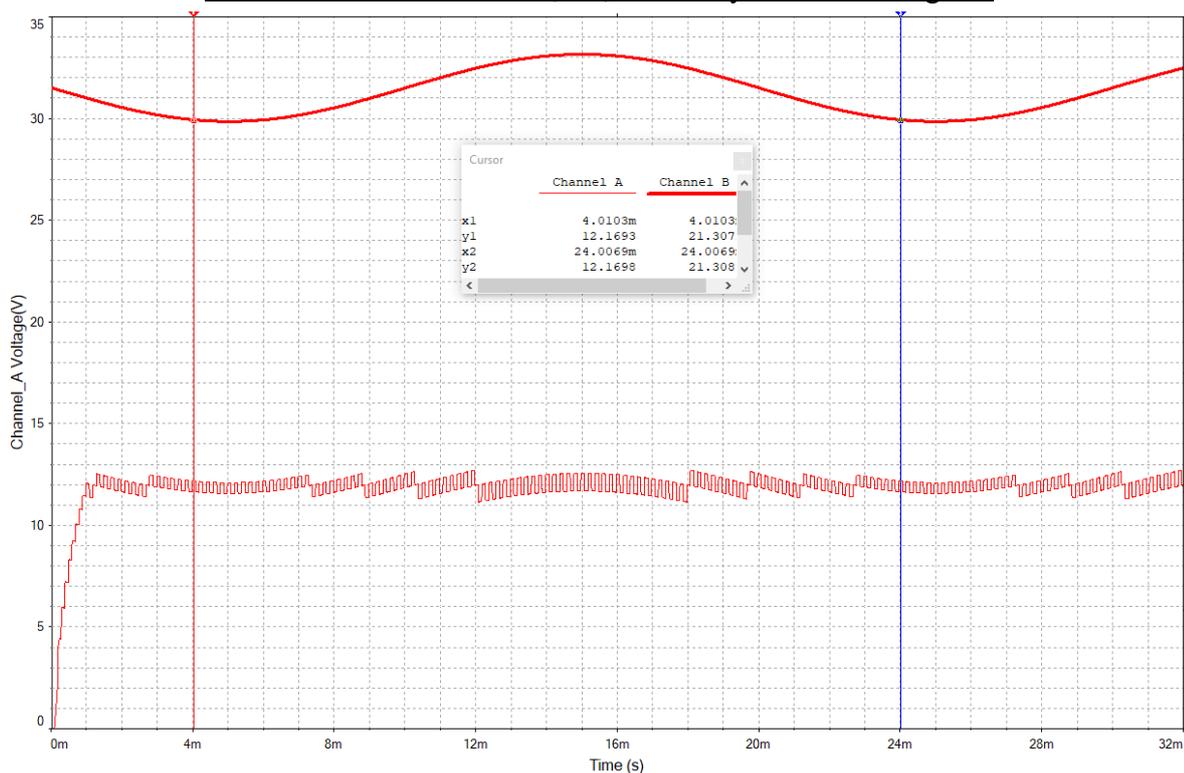


Рисунок 9 – Результати дослідження впливу пульсацій вхідної напруги на напругу навантаження ( $V_{in}$  з пульсаціями 2 В;  $V_{load} = 12$  В;  $F_{in}:F_{u100} = 1:100$ )

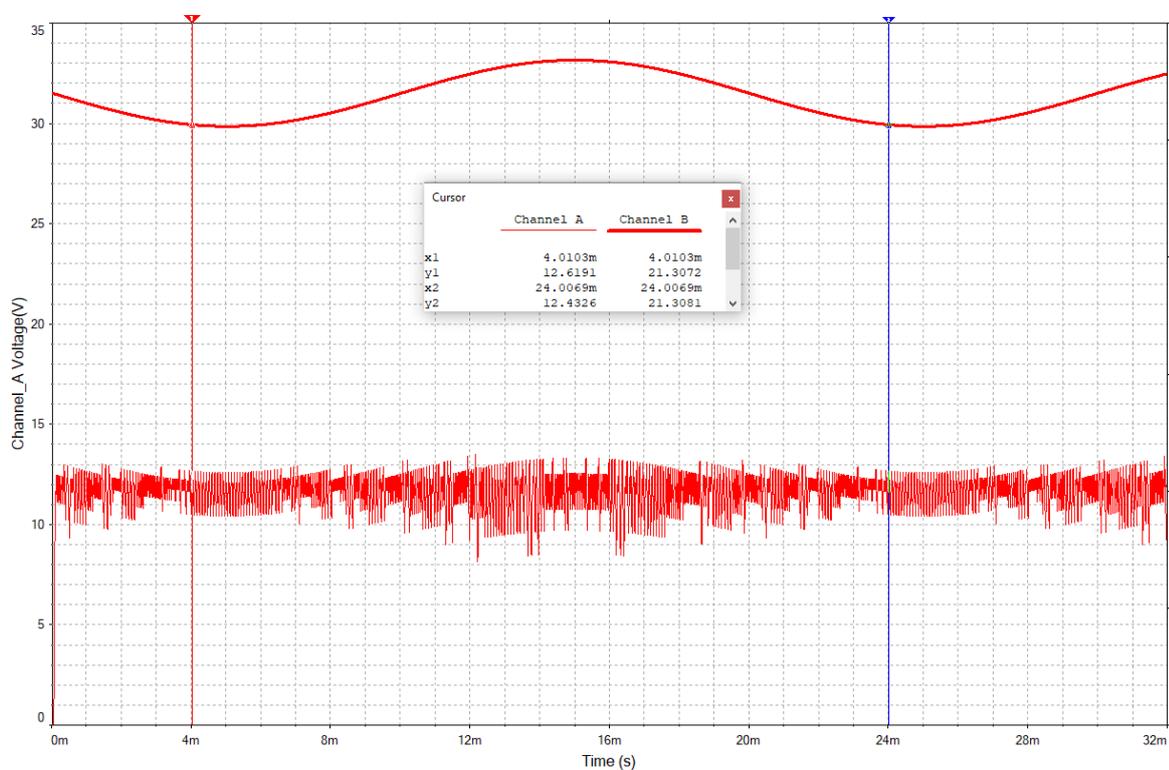


Рисунок 10 – Результати дослідження впливу пульсацій вхідної напруги на напругу навантаження ( $V_{in}$  з пульсаціями 2 В;  $V_{load} = 12$  В;  $F_{in}:F_{u10} = 1:1000$ )

**Висновки.** Аналіз результатів моделювання впливу пульсації напруги живлення на вихідну напругу цифрового контуру стабілізації при різних частотах тактового генератора показує, що рівень пульсацій при коливаннях в межах  $\pm 16,7\%$  і співвідношенні між частотою пульсації на навантаженні 1:10 становить 1,58 В (рисунок 8), а при співвідношенні 1:100 (Рисунок 9) та 1:1000 (Рисунок 10) амплітуда пульсації становить 1,53 В і 220 мВ.

Відповідно, відношення вихідної напруги до амплітуди пульсацій при різних частотах тактового генератора 1:10, 1:100 та 1:1000 становлять 7,6, 7,8, 54 рази.

Отже, використання ЦАП із струмовим виходом з метою підвищення напруги на навантаженні вище напруги живлення цифрової частини контуру стабілізації напруги постійного струму, що побудований за функціональною схемою наведеною на рисунку 2 в реальних умовах функціонування, забезпечує плавний запуск при регулюванні вихідної напруги постійного струму з низьким рівнем пульсацій без використання додаткових фільтрів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. An Introduction to Flyback Converters: Parameters, Topology, and Controllers. *Monolithic Power Systems*. 2023. 7 p. URL: <https://www.monolithicpower.com/en/an-introduction-to-flyback-convertersparameters-topology-and-controllers>.
2. Betten J. Flyback converter design considerations. Dallas: Texas Instruments, 2024. 4 p.
3. Fernandez-Serantes L.A., Casteleiro-Roca J.L., Berger H., Calvo-Rolle J.L. Hybrid intelligent system for a synchronous rectifier converter control and soft switching ensurement. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2022. Vol. 35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101189>.
4. Holovaty A., Łukaszewicz A., Teslyuk V., Ripak N. Development of AC Voltage Stabilizer with Microcontroller-Based Control System. *2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine. IEEE, 2022. P. 527–530. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000461>.
5. Метелиця А.О. Впровадження цифрового контура управління стабілізації напруги постійного струму в системах відновлювальної енергетики. *Молода наука 2024: зб. наук. пр. студентів, аспірантів і молодих вчених*. Запоріжжя: ЗНУ, 2024. Т. 5. С. 98.
6. Patel J., Naik A. A Low Voltage High-Speed Segmented Current Steering DAC for Neural Stimulation Application. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2020. Vol. 8(5). P. 4270–4274.
7. Singh D.K., Singh J., Ravela R.R. Design and Performance Study of Cost-Effective Smart Servo Controlled Automatic Voltage Stabilizer. *2020 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3)*, Gorakhpur, India. IEEE, 2020. P. 211–215. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICE348803.2020.9122815>.
8. SN7406N Datasheet. Texas Instruments. 2001. URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/27354/TI/SN7406N.html>.
9. Sorouri H., Sedighzadeh M., Oshnoei A., Khezri R. An intelligent adaptive control of DC-DC power buck converters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 141. P. 108099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.108099>.

10. Tsyurulnyk S., Tromsiuk V., Borodai Y., Metelytsya A., Nepiyvoda M. An Intelligent Adaptive DC Voltage Stabilization with a Digital Control Contour. *CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org)*. 2023. Vol. 3403. P. 248–262. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3403/paper20.pdf>.
11. Туровський О.Л., Лисенко Д.О. Динамічна модель комбінованого імпульсного стабілізатора напруги живлення телекомунікаційного обладнання з астатизмом другого порядку. *Наукові записки Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій*. 2024. № 1(5). С. 120–129. DOI: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2024.011515>.
12. Юрко О.О., Мосьпан Д.В., Кухаренко Д.В. Блок живлення з програмним керуванням. *Виклики та проблеми сучасної науки: зб. наук. пр.* 2023. Т. 1. С. 294–298. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22886720>.
13. Яндутьський О.С., Труніна Г.О., Нестерко А.Б. Регулювання напруги в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії: монографія. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
14. 2N4918G Datasheet. ON Semiconductor. 2004.  
URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/549965/ONSEMI/2N4918G.html>.

#### REFERNECEC

1. An Introduction to Flyback Converters: Parameters, Topology, and Controllers. *Monolithic Power Systems*. 2023. 7 p. URL: <https://www.monolithicpower.com/en/an-introduction-to-flyback-convertersparameters-topology-and-controllers>.
2. Betten J. Flyback converter design considerations. Dallas: Texas Instruments, 2024. 4 p.
3. Fernandez-Serantes L.A., Casteleiro-Roca J.L., Berger H., Calvo-Rolle J.L. Hybrid intelligent system for a synchronous rectifier converter control and soft switching ensurement. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. 2022. Vol. 35. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2022.101189>.
4. Holovatyy A., Łukaszewicz A., Teslyuk V., Ripak N. Development of AC Voltage Stabilizer with Microcontroller-Based Control System. *2022 IEEE 17th International Conference on Computer Sciences and Information Technologies (CSIT)*, Lviv, Ukraine. IEEE, 2022. P. 527–530. DOI: <https://doi.org/10.1109/CSIT56902.2022.10000461>.
5. Metelytsia A.O. Vprovadzhennia tsyfrovoho kontura upravlinnia stabilizatsii napruhy postiinoho strumu v systemakh vidnovliuvalnoi enerhetyky. *Moloda nauka 2024: zb. nauk. pr. studentiv, aspirantiv i molodykh vchenykh*. Zaporizhzhia: ZNU, 2024. Т. 5. S. 98
6. Patel J., Naik A. A Low Voltage High-Speed Segmented Current Steering DAC for Neural Stimulation Application. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2020. Vol. 8(5). P. 4270–4274.
7. Singh D.K., Singh J., Ravela R.R. Design and Performance Study of Cost-Effective Smart Servo Controlled Automatic Voltage Stabilizer. *2020 International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ICE3)*, Gorakhpur, India. IEEE, 2020. P. 211–215. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICE348803.2020.9122815>.
8. SN7406N Datasheet. Texas Instruments. 2001.

URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/27354/TI/SN7406N.html>.

9. Sorouri H., Sedighzadeh M., Oshnoei A., Khezri R. An intelligent adaptive control of DC-DC power buck converters. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. 2022. Vol. 141. P. 108099. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.108099>.

10. Tsyrlunyk S., Tromsiuk V., Borodai Y., Metelytsya A., Nepiyvoda M. An Intelligent Adaptive DC Voltage Stabilization with a Digital Control Contour. *CEUR Workshop Proceedings (CEUR-WS.org)*. 2023. Vol. 3403. P. 248–262. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3403/paper20.pdf>

11. Turovskiy O.L., Lysenko D.O. Dynamichna model kombinovanoho impulsnoho stabilizatora napruhy zhyvlennia telekomunikatsiinoho obladdannia z astatyzmom druhoho poriadku. *Naukovi zapysky Derzhavnogo universytetu informatsiino-komunikatsiinykh tekhnolohii*. 2024. № 1(5). S. 120–129. DOI: <https://doi.org/10.31673/2786-8362.2024.011515>.

12. Iurko O.O., Mospan D.V., Kukharenko D.V. Blok zhyvlennia z prohramnym keruvanniam. *Vykylyky ta problemy suchasnoi nauky: zb. nauk. pr.* 2023. T. 1. S. 294–298. DOI: <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.22886720>.

13. Iandulskiy O.S., Trunina H.O., Nesterko A.B. Rehuliuвання napruhy v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii: monohrafiia. Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho, 2021.

14. 2N4918G Datasheet. ON Semiconductor. 2004.

URL: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/549965/ONSEMI/2N4918G.html>

Received 10.10.2025.

Accepted 16.10.2025.

### **Digital control circuit for stabilizing DC voltage**

*The article presents an analysis of the operation of a digital control loop for stabilizing DC voltage, which utilizes a linear relationship between the duration of the pulse opening of the power-regulating element and the deviation of the output voltage from the nominal value. The design features and technical parameters of linear and pulse sequential DC voltage converters are analyzed. The study is based on the principle of operation of a step-down linear DC voltage stabilization system with pulse control. The work provides structural and functional diagrams of the development of the digital control loop for voltage stabilization. Simulation modeling of the proposed circuits was conducted in the Multisim software environment.*

*The digital control loop for DC voltage stabilization can be used in DC networks to ensure a stable DC voltage for components involved in energy generation and storage. Changes in load conditions affect the voltage quality in the DC voltage stabilization system. Under such conditions, an effective digital control loop for DC voltage stabilization is necessary to ensure proper operation of voltage converters and automatic regulation of battery charging.*

*The research is based on the development of structural and functional diagrams of the digital control loop for DC voltage stabilization using a 4-bit or 8-bit digital-to-analog converter with current control and a reference voltage  $V_{ref} = V_{in}$ .*

*Analysis of the simulation results of the impact of power supply voltage ripple on the output voltage of the digital DC voltage stabilization loop at various clock generator frequencies shows that, under ideal conditions ( $V_{in} = const$ ), the ripple level is 332 mV. When the power supply voltage fluctuates within  $\pm 11.7\%$  and the ratio of the ripple frequency at the*

load to the power supply voltage fluctuation frequency is 10:1, the ripple amplitude at the load is 1.24 V. Similarly, when the ratio of the ripple frequency at the load to the power supply voltage fluctuation frequency is 100:1, the ripple amplitude is 945 mV. Consequently, compared to ideal conditions, the ripple increases by a factor of 3.7 (1.24 V / 332 mV) at a frequency ratio of 10:1 and by a factor of 2.8 (945 mV / 332 mV) at a frequency ratio of 100:1.

*Simulation modeling of the developed circuits demonstrated the expected results of voltage stabilization using the digital control loop. Specifically, a smooth startup was observed during the regulation of the output DC voltage with a low ripple level without the use of additional filters. Additionally, through feedback, the output voltage is controlled, which eliminates the temperature and time drift of parameters typical of analog circuits.*

*Keywords: ADC, DAC, digital control loop, regulating element, control voltage, binary code, R-2R matrix, weighted resistors.*

**Метелиця Артем Олександрович** – викладач Вінницького технічного фахового коледжу, аспірант кафедри електричної інженерії та кіберфізичних систем, Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні Запорізького національного університету, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9383-7752>

**Metelitsa Artem Oleksandrovyich** – teacher at Vinnytsia Technical Vocational College, postgraduate student at the Department of Electrical Engineering and Cyberphysical Systems, Yu. M. Potebnia Engineering Educational and Scientific Institute of Zaporizhzhia National University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9383-7752>

## ВИКОРИСТАННЯ МЕТОДУ ПОСЛІДОВНОЇ АПРОКСИМАЦІЇ ДО СТИСНЕННЯ ЗОБРАЖЕНЬ

*Анотація.* Передача значного об'єму інформації потребує значної потужності і ємності джерела живлення, які є обмеженими. З цих причин термін функціонування міжпланетних станцій і інших роботизованих систем обмежений. Для подовження місії станцій «Вояджер-1» та «Вояджер-2», а також для передачі великої кількості інформації роботизованими системами на планети Сонячної системи – Місяць, Марс, Венера необхідно використати стиснення інформації. Експлуатація такого широкого спектру машин і механізмів показала, що основним обмеженням на терміни їх функціонування є обмеженість ємності джерел живлення. Терміни їх функціонування пропорційні об'єму переданої інформації, в тому числі, і зображень. Зрозуміло, що все це змушує скорочувати час роботи передавача, основного режиму витрат енергії. Таким чином, задача збільшення термінів функціонування пов'язана зі скороченням часу передачі даних. А це можливо за рахунок зменшення їх об'єму, тобто стиснення.

*Ключові слова:* стиснення інформації, роздільна здатність, матриці чисел, блоки розбивки зображень, метод послідовної апроксимації, мультиплікативна форма представлення зображень.

**Постановка проблеми.** Розробка процедур стиснення інформації набула особливої актуальності у зв'язку зі збільшенням кількості космічних місій на значні відстані, а також зі збільшенням об'єму передачі результатів досліджень. Так, стиснення інформації може відбуватись шляхом заміни передачі пікселів зображення передачею лише коефіцієнтів функцій, які апроксимують зображення. Ефективність такого стиснення пов'язана як з розмірами зображення так і з кількістю ділянок, на які може воно розбиватися, і, безумовно, залежить від ефективності методів і процедур апроксимації [5]. Застосування розробленого авторами методу послідовної апроксимації (МПА) для представлення функцій у околі точки у мультиплікативному вигляді до задач геотехнічної механіки показало свою ефективність. Причому отримані аналітичні вирази для обчислення функції були чинними не тільки у околі точки представлення, але й забезпечили інженерну точність на границях області визначення. Таке застосування МПА дозволило узагальнити результати досліджень і сформулювати гіпотезу про існування такого представлення для більш широкого класу задач та використати метод для розв'язування проблеми стиснення зображень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженню анкера, вибору значущих чинників впливу на його потужність, обґрунтуванню математичних моделей задач теорії пружності для півпростору з зафіксованим у ньому анкером присвячено значну кількість експериментальних і теоретичних робіт [2-3]. Практична оцінка та аналіз отриманих результатів приводять до необхідності розширення застосування математичних методів для зростання економічної ефективності гірничих виробок. Так, у роботі [1] запропоновано оцінювання впливу параметрів анкера на його потужність методом відтворення аналітичного виду функції, заданої у табличній формі, в околі точки із області її визначення. Розроблена методика представлення функції добутком функцій, кожна з яких залежить від однієї змінної. Дано оцінку верхньої межі похибки такого представлення. Обчислювальна ефективність методу [4] свідчить про можливість його застосування і отримання практичних результатів для інших інженерних задач.

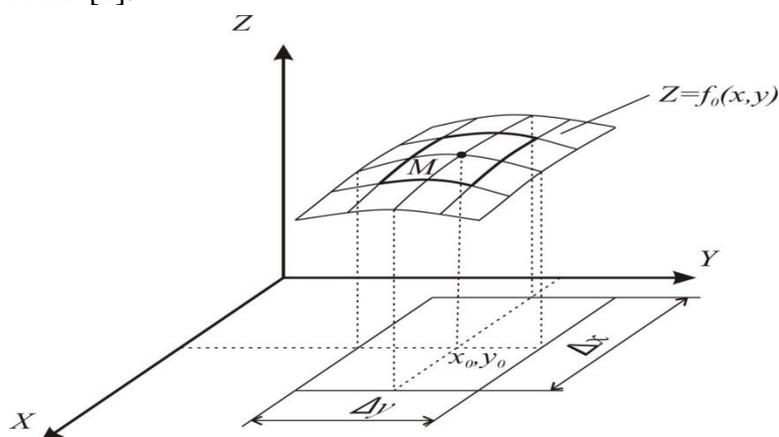
**Мета дослідження.** Продемонструвати ефективність використання МПА для стиснення зображень. Це відбувається шляхом розбиття зображення сіткою 4\*4 пікселів, апроксимацією функції густини зображення кожної з ділянок зображення з використанням МПА методу у вигляді поліномів четвертого степеня. Стиснення зображення відбувається за рахунок передачі коефіцієнтів поліномів замість передачі пікселів зображення за незначної втрати його якості.

**Викладення основного матеріалу дослідження.**

Успішне застосування МПА для дослідження широкого класу задач геотехнічної механіки і гірничого виробництва [1] дозволяє формулювати гіпотезу, зміст якої наведений далі.

Нехай існує скалярна функція  $F(X) = F(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , яка є обмеженою, визначеною і неперервною у замкнутій області  $\bar{D}$ . Точка  $M(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \in D$ .

Нехай  $\exists \varepsilon(M_0): \forall X \in \varepsilon(M_0) \Rightarrow |F(X) - \varphi(X)| \leq \varepsilon$ . Функція  $\varphi(X)$  належить певному класу і знаходиться згідно гіпотези та формул, наведених в роботі [1].



З фізичних міркувань розглядаємо прямокутну форму  $\varepsilon$  – "ОКОЛУ", який визначається нерівністю. Для простоти, без зменшення загальності наведений рисунок для  $M(x_0, y_0)$  та функції  $Z = f_0(x, y)$ .

Рисунок 1 - Вибір прямокутного «околу» точки

На рис.1 наочно представлена множина точок «околу», яка визначається нерівністю

$$\max \left\{ \frac{\Delta_x}{2}, \frac{\Delta_y}{2} \right\} = \max \{ |x - x_0|, |y - y_0| \} < \varepsilon.$$

Далі розглянемо представлення функції  $\varphi(X)$  у вигляді добутку функцій, кожна з яких залежить лише від однієї функції, тобто суть методу послідовної апроксимації (МПА) [1]. Це обумовлено послідовним характером дій, які полягали в утворенні функцій  $f_i(x_i)$  та знаходженні їх апроксимацій  $g_i(x_i)$ . Алгоритм роботи методу полягає у виконанні наступних етапів.

1. Обираємо точку

$$M = M(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \in D.$$

2. Утворюємо функції

$$f_1(x_1) = F(x_1, x_2^0, \dots, x_n^0), f_2(x_2) = F(x_1^0, x_2, \dots, x_n^0), \dots f_n(x_n) = F(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n).$$

3. Знаходимо  $g_1(x_1), g_2(x_2), \dots, g_n(x_n)$ , які належить певному класу функцій та точно апроксимують утворені функції  $f_i(x_i)$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

4. Знаходимо коефіцієнт апроксимації, який визначається формулою

$$\alpha = \frac{F(M_0)}{g_1(x_1^0) \cdot g_2(x_2^0) \cdot \dots \cdot g_n(x_n^0)}.$$

5. Остаточно, згідно гіпотези, доведеної в[1], отримаємо

$$F(x_1, x_2, \dots, x_n) = \alpha g_1(x_1) \cdot g_2(x_2) \cdot \dots \cdot g_n(x_n)$$

**Зауваження.** Розташування точки  $M = M(x_1^0, x_2^0, \dots, x_n^0) \in D$  істотним чином залежить від складності процесу та області його визначення, а тому впливає на вид представлення функції. На вибір точки із області визначення впливають попередні знання особливостей функції та кваліфікація дослідника. У випадку складних функцій і відсутності попередніх знань поведінки результативної функції пропонується обирати її у центрі області визначення, тобто координати визначати за формулою  $x_j = \frac{b_j - a_j}{2}$ , де  $a_j, b_j$  – початок і кінець інтервалу змін параметра. Очевидно, що алгоритм прозорий та зручний, а його застосування в практичних задачах є актуальним.

Загальновідомо, що чим вища роздільна здатність зображення, тим кращою буде його якість. Виникає протиріччя: для передачі якісного зображення треба збільшувати роздільну здатність зображення, а для скорочення об'єму передачі інформації її потрібно зменшувати. Для вирішення цього протиріччя пропонується застосувати МПА до кожної ділянки, на які попередньо було розбито зображення. Сформулюємо ідею стиснення із застосуванням процедури МПА.

1. На кожній ділянці зображення, а вона являє собою матрицю чисел, обрати точку у околі якої може бути виконана апроксимація функції якості зображення у вигляді добутку двох функцій апроксимацій у вертикальній і горизонтальній площинах. Ці функції обов'язково проходять через обрану точку.

2. Якщо апроксимацію виконувати поліномами, то передавати пікселі немає потреби, просто треба передавати коефіцієнти поліномів. Іншими словами, обравши середню роздільну здатність зображення та розбивши його на блоки, треба виконати апроксимацію цих числових даних.

3. Зображення відновлювати у центрі керування на Землі у мультиплікативному вигляді. Таким чином, як показують дослідження такого застосування, можна отримувати зображення за передачі зменшеної кількості інформації (коефіцієнт стиснення може складати до 30% від оригіналу). Результати підтверджено на прикладах відновлення ряду стандартних зображень для різних значень роздільної здатності зображень.

За допомогою представленого алгоритму було проведено обчислювальні експерименти, які ілюструють його ефективність. На рис. 2 зображені результати представлення різних функцій двох змінних, заданих за допомогою таблиці у чотирьох точках. Кружечками позначені табличні значення функцій, лінія визначає функцію визначену алгоритмом у вигляді многочлена.

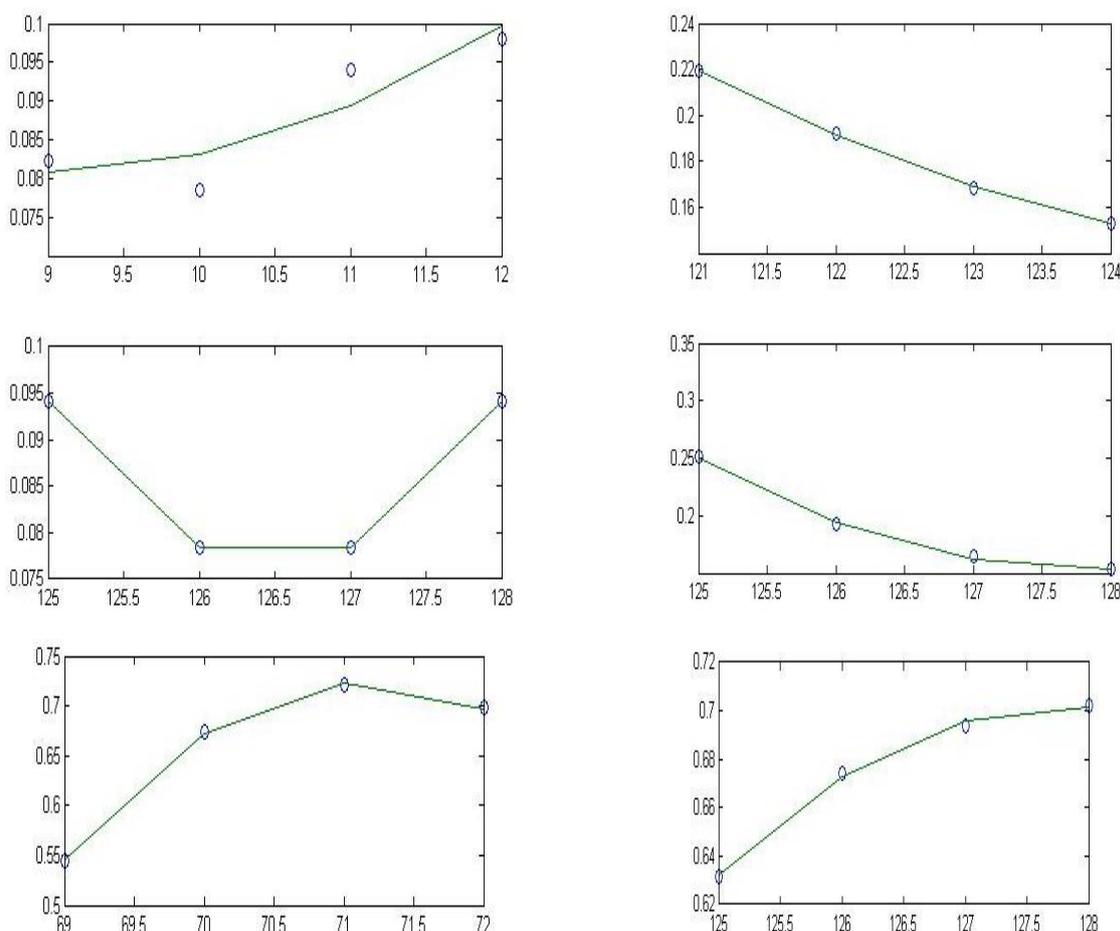


Рисунок 2 – Графіки функцій, побудованих з використанням добутку многочленів

першого(ліворуч) та другого(праворуч) степенів.

Наведені графіки свідчать, що невелике число точок, а також досить прості многочлени забезпечують достатню для практики точність результатів.

Далі розглянемо випадок апроксимації табличних функцій, визначений у восьми точках та представлених добутком многочленів четвертого степеня. Результати обчислень наведені на рис.3. В цьому випадку точність результатів погіршується. Очевидно, що це пов'язано зі збільшенням складності зображення на такій площі (збільшення кількості точок), а тому вимагає використання многочленів високих степенів. Ця обставина призводить до втрати ступеню стиснення і у подальшому на рисунках не наводиться.

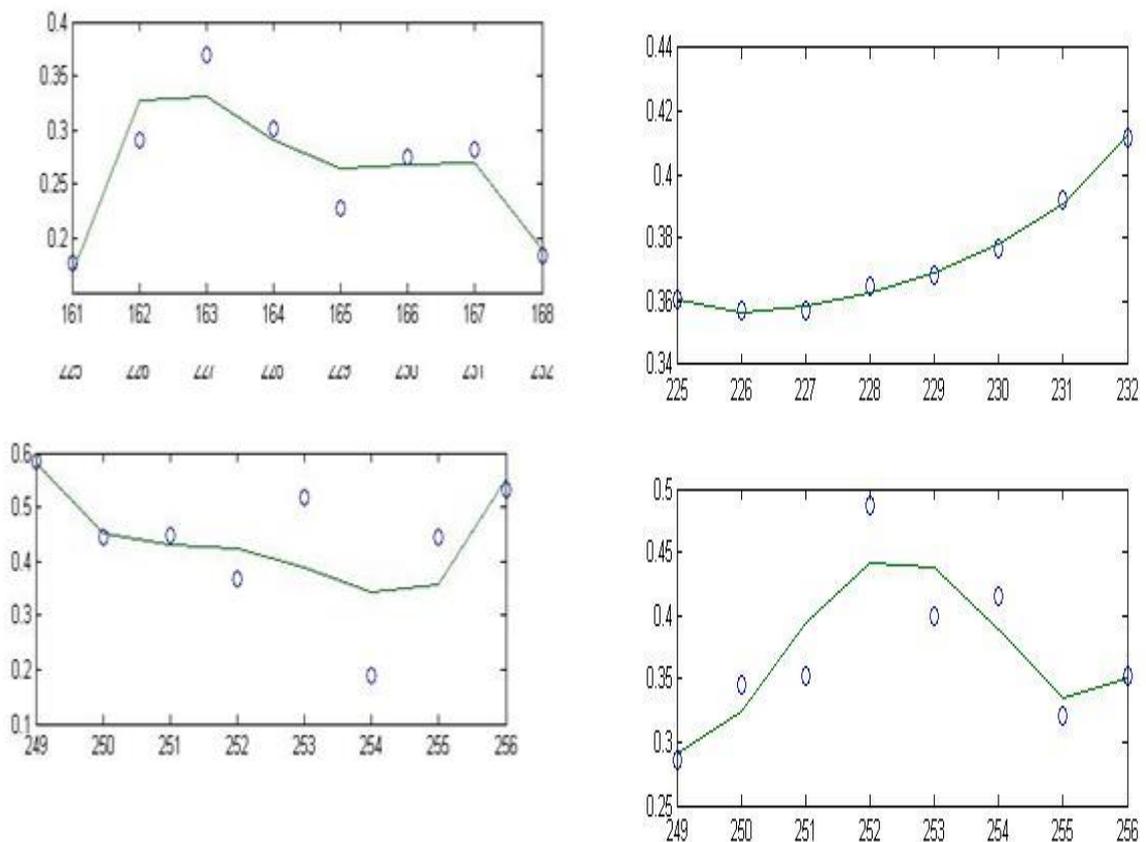


Рисунок 3 – Графіки функцій, побудованих з використанням добутку многочленів четвертого степеня

Далі, на рис. 4–7 наведемо зразки ефективного використання алгоритму при передачі стисненні візуальної інформації. Зразки виготовлені для різних розмірів оригінальних зображень, до яких додаються необхідні коментарі практичного змісту. Це робить можливим використання результатів досліджень.

отримане  $4 \times 4 \ a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a$



початкове

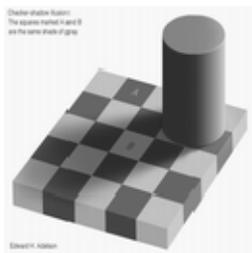
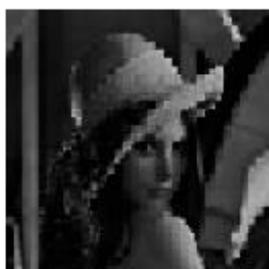


Рисунок 4 - Оригінальне зображення має розмір 16,1 кб

отримане  $4 \times 4 \ a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a$



початкове



Рисунок 5 - Оригінальне зображення має розмір 40,1 кб

полученное  $4 \times 4 \ a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a$



оригинальное



Рисунок 6 - Оригінальне зображення має розмір 26,4 кб

полученное  $4 \times 4 \ a_2 \cdot x^2 + a_1 \cdot x + a$



оригинальное



Рисунок 7 - Оригінальне зображення має розмір 27,2 кб

Загальна кількість коефіцієнтів  $128 \times 128 = 16384$ .

Кількість коефіцієнтів потрібних для передачі зображення після розбивки на матрицю

$$4 \times 4 \ 6 \cdot 32 \cdot 32 = 6144.$$

Перше отримане зображення 14,3 кб.

Загальна кількість коефіцієнтів  $128 \times 128 = 16384$ .

Кількість коефіцієнтів потрібних для передачі зображення після розбивки на матрицю

$$4 \times 4 \ 6 \cdot 32 \cdot 32 = 6144.$$

Перше отримане зображення 15,9 кб.

Загальна кількість коефіцієнтів  $256 \times 256 = 65536$ .

Кількість коефіцієнтів потрібних для передачі зображення після розбивки на матрицю

$$4 \times 4 \ 6 \cdot 64 \cdot 64 = 24576.$$

Перше отримане зображення 8,03 кб.

Загальна кількість коефіцієнтів  $256 \times 256 = 65536$ .

Кількість коефіцієнтів потрібних для передачі зображення після розбивки на матрицю

$$4 \times 4 \ 6 \cdot 64 \cdot 64 = 24576.$$

Перше отримане зображення 11,2 кб.

**Висновки.** Застосування розробленого авторами методу послідовної апроксимації (МПА) для представлення функцій у околі точки із області визначення у мультиплікативному вигляді до задач геотехнічної механіки показало свою ефективність. Причому отримані аналітичні вирази для обчислення функції були вірними не тільки у околі точки представлення, але й забезпечили інженерну точність на границях області визначення. Це надихнуло авторів використати МПА для стиснення зображень. Відомо, чим вища роздільна здатність, тим кращою буде його якість. Виникає протиріччя: для передачі якісного зображення треба збільшувати роздільну здатність зображення, а для скорочення об'єму передачі інформації її потрібно зменшувати. Для вирішення цього протиріччя пропонується застосувати МПА до кожної ділянки, на які попередньо було розбито зображення. Ідея стиснення із застосуванням процедури МПА полягає у наступному: на кожній ділянці зображення, а вона являє собою матрицю чисел, обрати точку у околі якої буде виконана апроксимація функції якості зображення, або просто зображення у вигляді добутку двох функцій апроксимацій у вертикальній і горизонтальній площинах, які обов'язково проходять через обрану точку. Якщо апроксимацію виконувати поліномами, то передавати пікселі немає потреби, просто треба передавати коефіцієнти поліномів. Тобто, обравши середню роздільну здатність зображення, та, розбивши його на блоки, виконати апроксимацію цих числових даних. Зображення відновлювати у центрі керування на Землі у мультиплікативному вигляді. Таким чином, як показують дослідження такого застосування, можна отримувати зображення за передачі зменшеної кількості інформації (коефіцієнт стиснення може скласти 30% від оригіналу). Результати підтверджено на прикладах відновлення ряду стандартних зображень для різних значень роздільної здатності зображень.

Таким чином, застосування апроксимації до передачі зображень підтвердило свою ефективність у напрямку стиснення зображень.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Ларіонов Г.І. Оцінювання конструктивних параметрів анкерного кріплення. Дніпропетровськ: Національна металургійна академія України, 2011.–286с.
2. Ларіонов Г.І. Про вплив глибини розробки та попереднього навантаження на щільність розташування анкерів. Методи розв'язування прикладних задач механіки деформованого твердого тіла. Дніпропетровськ: Вид-во «Наука і освіта», 2008.–Вип.9 – С. 115 – 128.
3. Круковский А.П. Методи расчета анкерной цепи. Проблемы обчислювальної механіки і міцності конструкцій. Дніпропетровськ: Вид-во «Наука і освіта», 2005.–Вип.9 – С. 92 – 99.
4. Yeromin O., Larionov G., Kulikov A., Fedak M., Krenicky T., Gupalo O., Myanovskaya Y. Method of Sequential Approximation in Modelling the Processes of Heat Transfer and Gas Dynamics in Combustion Equipment. MDPI: Applied sciences, 2022.–18с.
5. Ларіонов Г.І., Волошко В.Л. Про один підхід до стиснення зображень із застосуванням процедури апроксимації. Тези XVIII Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 12-13 грудня 2024 р.) – Д.: УДУНТ. – С.62

Received 14.10.2025.  
Accepted 21.10.2025.

***Application of the method of successive approximation  
for image compression***

*The transmission of large volumes of information requires significant power and storage capacity of power sources, which are limited. For these reasons, the operational lifetime of interplanetary stations and other robotic systems is restricted. To extend the missions of the Voyager-1 and Voyager-2 spacecraft, as well as to enable the transmission of large amounts of data from robotic systems to the planets of the Solar System — the Moon, Mars, and Venus - it is necessary to use data compression.*

*The operation of such a wide range of machines and mechanisms has shown that the main limitation on their operating time is the limited capacity of power sources. The duration of their functioning is proportional to the volume of transmitted information, including images. Clearly, this requires reducing the operating time of the transmitter, which is the main mode of energy consumption.*

*Thus, the problem of extending the operational lifetime of such systems is directly related to reducing the data transmission time. This, in turn, can be achieved by reducing the data volume - that is, through compression.*

*Keywords: information compression, resolution, numerical matrices, image partition blocks, method of successive approximation, multiplicative form of image representation.*

**Ларіонов Григорій Іванович** – д. т. н., старший науковий співробітник відділу механіки гірничих порід Інституту геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4774-0992>

**Волошко Віктор Леонідович** – к. ф.-м. н., доцент кафедри обчислювальної математики та математичної кібернетики Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1285-9448>

**Larionov Hryhoryi** - Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Senior Researcher, Senior Researcher in Rock Mechanics Department, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poljakov of National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine, [igtmlarionov@gmail.com](mailto:igtmlarionov@gmail.com), ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4774-0992>

**Voloshko Viktor** - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor of the Department of Computational Mathematics and Mathematical Cybernetics of Oles Honchar Dnipro National University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1285-9448>

## АРХІТЕКТУРА ЕКСПЕРТНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЗНІМКІВ ПАМ'ЯТІ

*Анотація.* Запропоновано архітектуру експертної системи на основі правил, що призначена для аналізу знімків пам'яті програмних додатків з метою виявлення і усунення неефективного використання пам'яті. Система використовує продукційні правила, що ґрунтуються на знаннях про типи об'єктів та їхні властивості (зокрема, незмінність), статистику алокацій та розподіл об'єктів у пам'яті. Розроблено формальну модель представлення знімку пам'яті як сукупності об'єктів з певними атрибутами, введено критерії виявлення дублікатів незмінної інформації та надлишкового резервування пам'яті. Описано механізми групування об'єктів за типами і значеннями для діагностики дублювання даних, а також методи визначення неефективних алокацій, зокрема, надмірного розміру структур даних відносно їх корисного вмісту). Система генерує рекомендації у вигляді інструкцій щодо оптимізації коду, а саме впровадження кешування або пулів об'єктів, перерозподіл структури даних тощо. В системі здійснюється оцінювання очікуваного виграшу в пам'яті. Наведено математичні формалізації для опису вхідних даних, операцій групування, фільтрації та порівняння об'єктів.

*Ключові слова:* експертна система, знімок пам'яті, дублювання даних, неефективні алокації, продукційні правила, пул об'єктів, оптимізація пам'яті.

**Вступ.** Ефективне використання пам'яті є важливою складовою продуктивності програмного забезпечення. Неналежне управління пам'яттю, зокрема дублювання даних або використання неефективних структур даних, призводить до надмірного використання оперативної пам'яті і погіршення швидкодії програмних додатків [1]. Більшість існуючих досліджень зосереджені на проблемі витоків пам'яті, тоді як інші аспекти, такі як дублювання незмінної інформації, виділення надмірних обсягів пам'яті під дані, вивчені менш ретельно [2]. Метою роботи є побудова експертної системи для автоматизованого аналізу знімків пам'яті та виявлення надмірного використання пам'яті з подальшою генерацією рекомендацій щодо їх усунення. Експертні системи широко використовуються у сфері кібербезпеки для кластеризації ознак аномалій і кібератак для їх виявлення [3]. Експертна система продемонструвала точність розпізнавання атак у межах 76–99%, що є співставним із результатами провідних нейромережових методів. Схоже застосування запропоновано у моделі адаптивного виявлення аномалій на основі логічних процедур [4]. Автори розробили систему “Threat Analyzer”,

яка автоматично формує матриці ознак для різних класів аномалій та атак, що забезпечує ефективну ідентифікацію відхилень у критично важливих комп'ютерних системах.

У роботі [5] розглядається проблема виявлення аномалій у сенсорних даних процесу буріння нафтових свердловин за умов невизначеності та неповноти вимірювань. Запропоновано алгоритм детектування відхилень, що базується на правилах із коефіцієнтами впевненості, який дозволяє враховувати нечіткість, шум і похибки сенсорних показників. Експертні знання про нормальну динаміку параметрів (тиску, температури, швидкості обертання тощо) формалізуються у вигляді правил, що сигналізують про відхилення від нормативних значень.

У роботі [6] продемонстровано підхід до діагностики аномалій у складних програмних системах на основі строгих математичних моделей. Використання проєкційних перетворень і сингулярного розкладу дозволило досягти високої точності виявлення аномальних станів при помірних затратах обчислювальних ресурсів. Це підтверджує ефективність поєднання математичного моделювання та аналізу знімків стану системи для ідентифікації проблем у її роботі.

У роботі [7] зроблено акцент на формальному критерії виявлення аномалій. Введений авторами інтегральний показник базується на перевірці однорідності вибірок вхідних параметрів, що дозволяє своєчасно відокремити аномальні режими роботи системи. Експериментально підтверджено високий рівень достовірності методу, що свідчить про перспективність такого підходу для підвищення надійності моніторингу станів програмно-апаратних комплексів.

Для вирішення поставленої задачі по виявленню збільшеного використання пам'яті реалізовано рішення у вигляді *рекомендаційної системи*, яка має допомогти інженерам визначати джерела неефективного використання пам'яті та запропонувати ефективні рішення на основі кількісної оцінки.

Для досягнення поставленої мети сформовано базу знань, що включає відомості про інтерпретацію знімків пам'яті, типи та властивості об'єктів (зокрема *незмінність*), статистичні характеристики алокації (розміри масивів, коефіцієнти заповнення структур даних тощо), а також правила (евристики) типу *умова*  $\rightarrow$  *дія*. Умови правил описують характерні *сценарії неефективного використання пам'яті* (наприклад, наявність багатьох однакових рядкових констант або структур даних із великим невикористаним резервом), а дії містять рекомендації щодо оптимізації – такі, як застосування пулу об'єктів, інтернування рядків чи зміна структури даних.

**Постановка задачі.** Розглядається задача побудови експертної системи, яка здатна на основі інформації зі знімків пам'яті автоматично виявити дублювання незмінної інформації, надмірне резервування пам'яті, надмірний розмір колекцій, та інші сценарії неефективного використання пам'яті під час роботи програмного додатку. Експертна система повинна надати рекомендації щодо усунення проблем надмірного використання пам'яті, а саме зменшення дублювання, перерозподіл пам'яті, зміну типу зберігання даних, та оцінити ефект оптимізації у відсотках економії пам'яті відносно загального обсягу використання. Необхідно: розробити формальні моделі, що описують знання

про предметну область; виявити типові ситуації надмірного використання пам'яті з подальшою генерацією рекомендацій щодо їх усунення; розробити архітектуру експертної системи, механізм виведення; провести тестування розробленої експертної системи на даних знімків пам'яті, отриманих з промислових систем.

**Модель знань.** Об'єктом дослідження в експертній системі є *знімок пам'яті* програми (memory dump), який зафіксовано станом керованої пам'яті у визначений момент часу. Знімок пам'яті можна подати у вигляді структурованого масиву байтів в такий спосіб:  $M_{time} = [b_1, b_2, \dots, b_N]$ , де *time* – момент часу, у який відбувається зняття знімку пам'яті;  $b_1, b_2, \dots, b_n$  – байти, з яких складається знімок;  $N$  – кількість байтів [8].

Введемо поняття середовища виконання Common Language Runtime (CLR), об'єкту  $o$  та типу  $t$ . CLR керує виконанням програм та забезпечує управління пам'яттю, безпеку типів, обробку виняткових ситуацій (помилки). Тип ( $t$ ) – це категорія даних, що визначає розмір, діапазон та операції над значеннями. У C# кожна змінна, константа, вираз, параметр та значення, що повертається, має тип. Типи можуть бути попередньо визначеними (наприклад, String, Integer тощо), або визначеними користувачем. Об'єктом  $o$  є екземпляр типу  $t$ , для зберігання якого виділяється пам'ять в діапазоні пам'яті. Об'єкт  $o$  можна ідентифікувати та маніпулювати ним за допомогою посилання на його адресу ( $a$ ). На рис.1 зображено приклад об'єкту  $O_x$  в знімку пам'яті, в рамці 1 позначено адресу  $a \in [b_1, b_2, \dots, b_n]$ , за якою об'єкт  $O_x$  знаходиться у пам'яті,  $a(o_x) = 25daffe2c0$ ; в рамці 2 позначено тип  $t(o_x) = \text{"System.String"}$  об'єкту  $o$ , що характеризується адресою, за якою визначений тип; пунктирною лінією (3) позначено розмір ( $s$ ) об'єкту  $o$  в байтах,  $s(o) = 34$  байта; поля  $fl$  об'єкту  $o$  визначаються типом  $t$  і містять дані, що позначені у рамці 4,  $fl(o) = \{ fl_{m\_stringLength}, fl_{m\_firstChar} \}$ . Таким чином, екземпляр об'єкту задається в вигляді  $o_m = (a, t, s, fl)$ .

```

0:000> !mdt 225daffe2c0
00000225daffe2c0 (System.String) .length=4, .string="true"
0:000> !do 225daffe2c0 1
Name: System.String
MethodTable: 00007ff8d05a59c0 2
EEClass: 00007ff8d0582ec0
Size: 3 34(0x22) bytes
File: C:\Windows\Microsoft.Net\assembly\GAC_64\mscorlib\v4.0.0.0_b77a5c561934e089\mscorlib.dll
String: true
Fields:
      MT      Field      Offset      Type VT      Attr      Value Name      4
00007ff8d05a85a0 4000283      8      System.Int32 1 instance      4 m_stringLength
00007ff8d05a6838 4000284      c      System.Char 1 instance      74 m_firstChar
00007ff8d05a59c0 4000288     e0      System.String 0 shared      static Empty
>> Domain:Value 00000221f9b0b680:NotInit 00000226fd0157a0:NotInit <<
0:000> du 225daffe2cc
00000225`daffe2cc "true"
0:000> db 225daffe2cc
00000225`daffe2cc 74 00 72 00 75 00 65 00-00 00 00 00 00 00 00 00 00 t.r.u.e.....
00000225`daffe2dc 00 00 00 00 00 00 00 00-00 00 00 00 c0 59 5a d0 .....YZ.
    
```

Рисунок 1 - Приклад об'єкту у знімку пам'яті

Обсяг пам'яті, що керується CLR у знімку, дорівнює сумі розмірів пам'яті, що виділяється для зберігання кожного з об'єктів:

$$OriginalHeapSize_{time} = \sum_1^m(S(o_m)).$$

Для подальшого аналізу визначимо  $Opt$  підмножину об'єктів  $opt$ , що не містять дублювання, тоді:

$$OptHeapSize_{time} = \sum_1^k(S(opt_k)) ,$$

де  $k$  – загальна кількість унікальних об'єктів у знімку пам'яті, що знятий в момент часу  $time$ .

Для оцінки надмірного використання пам'яті будемо застосовувати відношення:

$$\frac{OptHeapSize_{time}}{OriginalHeapSize_{time}}$$

Іншими словами, якщо у знімку присутні кілька різних об'єктів з однаковим внутрішнім станом (значеннями полів), до  $Opt$  належить лише один представник кожної унікальної комбінації значень. На основі цього вводиться показник *надмірного використання пам'яті* як відношення:

$$E = \frac{S_{total} - S_{opt}}{S_{total}} \times 100\% ,$$

де  $S_{opt}$  – сумарний розмір об'єктів без дублювання. Показник  $E$  (виражений у відсотках) відображає, яка частка пам'яті витрачається надміру через дублювання даних або неефективні алокації. Наприклад, якщо  $E=43\%$ , це означає, що майже половина пам'яті зайнята зайвими копіями даних, які потенційно можуть бути усунені або через шаблон пул об'єктів, або через шаблон енкодер.

**Групування та фільтрація об'єктів.** Для аналізу пам'яті у знімку система застосовує *операції групування* об'єктів за певними критеріями, що відповідають гіпотезам про неефективність. Маємо множину об'єктів  $O_{time}$  (містить усі об'єкти  $o$ ) та множину типів  $T_{time}$  (усі типи  $t$ ), які відображені у знімку пам'яті знятому у момент часу  $time$ . Враховуючи, що кожен об'єкт  $o$  є екземпляром типу  $t$ , введемо функцію групування  $G$ , яка групує елементи вхідної множини об'єктів  $O$  за типами:

$$G(O): O \rightarrow T.$$

В результаті операції групування отримано підмножини  $O_t$ , які містять усі об'єкти типу  $t$ :

$$G(O_{time}) = \{ \{O_{time,t_1}, t_{time,t_1}\} \dots \{O_{time,t_i}, t_{time,t_i}\} \}, \text{ де } \{t_1 \dots t_i\} \subseteq T$$

Ця операція дозволяє отримати статистику кількості об'єктів кожного типу, аналізувати розподіли об'єктів за значеннями і структурними характеристиками.

**Пошук дублікатів незмінних об'єктів.** Виділимо з множини типів  $T$  підмножину типів  $R$ , які мають властивість незмінності [9]. Властивість незмінності полягає у тому, що створений екземпляр об'єкту не має змінних полів всередині і не може бути модифікованим. Враховуючи, що кожен об'єкт є екземпляром типу, з вхідної множини об'єктів виділимо об'єкти, які мають тип з властивістю незмінності:

$$\begin{cases} Immutable: T \rightarrow \{true, false\} \\ R = \{t \in T \mid Immutable(t)\} \\ O_R = \{o_{tim} \in O \mid t_{im} \in R\} \end{cases}$$

В результаті отримаємо множину  $O_R$ , що складається виключно з об'єктів, які є екземплярами незмінних типів.

Для кожного типу  $r \in R$  виконується групування об'єктів цього типу за їхнім внутрішнім станом (набором значень полів). Оскільки об'єкти незмінні, можна отождити їх стан із сукупністю байтів, що описують об'єкт у пам'яті. Нехай  $Val(o_r)$  позначає відображення об'єкта  $o_r$  на його значення (послідовність байтів).

$$\left\{ \begin{array}{l} O_r \subseteq O \\ Val : O_r \rightarrow V_r \\ Val(o) = v \\ o_1 \sim o_2 \Leftrightarrow Val(o_1) = Val(o_2) . \\ V_r = \{ Val(o) \mid o \in O_r \} \\ G_{val}(O_r) = \frac{O_r}{\sim} = \{ O_{r,v} \mid v \in V_r \} \\ \mu_r = \frac{|O_r|}{|G_{val}(O_r)|} \end{array} \right.$$

Тоді групування за значенням розбиває множину об'єктів  $O$  типу  $r$  на підмножини  $O_{r,v}$  з однаковим значенням  $v$ . Кожна така підмножина  $O_{r,v}$  містить об'єкти типу  $r$  з ідентичним вмістом.

Правила експертної системи сформулюємо у вигляді продукцій «ЯКЩО ситуація, ТО дія». Тоді, в разі виявлення середньої кратності повторення  $\mu_r$  більшої за задану  $N$ , можна сформулювати експертне правило, яке надає рекомендацію використання інтернування, в такий спосіб:

$$\mathbf{IF} r \in R \wedge \mu_r > N \mathbf{THEN} Recommend(Intern(r)).$$

**Виявлення надмірного діапазону значень.** Ще однією типовою ситуацією надмірного використання обсягу пам'яті є застосування діапазону значень більшого, ніж потрібно для виконання певної операції [10]. Позначимо  $T_{inv} \subseteq T$  – множину обраних типів. Для кожного типу  $t \in T_{inv}$  введено множину обраних незмінних полів цього типу  $FL_{inv}(t)$ . Для кожного поля  $fl_t \in FL_{inv}(t)$  діапазон значень визначається:

$$\left\{ \begin{array}{l} T_{inv} \subseteq T, O_t \subseteq O, t \in T_{inv} \\ Val_{fl}: O_t \rightarrow Dom(fl) \\ ActualRange_{t,fl} = [\min_{o \in O_t} Val_{fl}(o), \max_{o \in O_t} Val_{fl}(o)] \\ TheoRange(fl) = [minDom(fl), maxDom(fl)] \\ \eta(t, fl) = \frac{\max ActualRange_{t,fl} - \min ActualRange_{t,fl} + 1}{\max TheoRange(fl) - \min TheoRange(fl) + 1} \\ 0 < \eta \leq 1 \end{array} \right.$$

Для кожного типу  $t$  з множини  $T_{inv}$  виконується пошук діапазону фактичних значень кожного з обраних полів  $fl_{inv}$ . З відношення фактичного діапазону даних до теоретично виділеного можна обчислити коефіцієнт використання діапазону значень. Отриманий коефіцієнт застосовано для формулювання правила про обрання типу даних, який потребує менше пам'яті, та з надлишком покриває знайдений діапазон значень:

$IF t \in T_{inv} \wedge fl \in FL_{inv}(t) \wedge \eta(t, fl) \leq \tau THEN Recommend(fl \rightarrow ShrinkType(ActualRange_{t, fl}))$

**Виявлення втрат пам'яті через вирівнювання (padding) об'єктів CLR.** У середовищі виконання CLR об'єкти мають мінімальний розмір  $S_{min}$ , який складається з заголовку об'єкту *Header* та зарезервованого місця під дані *Reserved*. Об'єкти підлягають вирівнюванню  $Align(x)$  за межами, кратними розміру машинного слова (64 біт, або 8 байт). Це призводить до збільшення фактичного обсягу пам'яті, зайнятого об'єктом, порівняно з обсягом корисних даних. Для кожного типу визначається фактичний розмір об'єкта в пам'яті  $S_{actual}(t)$  та теоретичний розмір  $S_{raw}(t)$ , обчислений як сума розмірів його полів без урахування вирівнювання. На основі співвідношення між цими величинами оцінюється частка пам'яті  $Loss_{padding}(t)$ , втраченої внаслідок зсуву:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{min} = Header + Reserved = 16 + 8 = 24 \\ Align(x) = 8 * \left\lceil \frac{x}{8} \right\rceil \\ S_{fields}(t) = \sum_{i=1}^m s(fl_i) \\ S_{raw}(t) = Header + \max(S_{fields}(t), Reserved) \\ S_{actual}(t) = Align(S_{raw}(t)) \\ Loss_{padding}(t) = \frac{S_{actual}(t) - S_{raw}(t)}{S_{raw}(t)} \end{array} \right.$$

Отримане значення дозволяє сформулювати правило для зменшення розміру полів за умови досягнення граничного значення  $\tau_{pad}$ :

$IF Loss_{padding}(t) \geq \tau_{pad} THEN Recommend(RepactFields(t)).$

Це правило посилює ефект рекомендації наданої правилом щодо «Виявлення надмірного діапазону значень».

**Виявлення надмірної ємності колекцій.** Виявлення надмірної ємності колекцій [11] є узагальненням підходу щодо групування значень полів, оскільки застосовується до типів-колекцій  $T_{col}$  та здійснює групування за структурними характеристиками – фактичною кількістю елементів та ємністю внутрішніх буферів. Введемо функцію  $FieldType(fl)$ , яка повертає тип значення поля та за типом виявляє тільки колекції:

$$\left\{ \begin{array}{l} FieldType: FL \rightarrow T \\ Collection: T \rightarrow \{true, false\} \\ FL_{col}(t) = \{ fl \in FL_{inv}(t) \mid Collection(FieldType(fl)) \} \\ Collection(List < T >) = true, Collection(Dictionary < K, V >) = true \end{array} \right.$$

До типів колекцій відносяться, зокрема,  $List<T>$  (*список*) та  $Dictionary<K, V>$  (*словник*), які є найбільш поширеними структурами у .NET-системах. Список ( $List<T>$ ) – це впорядкована змінна структура, що реалізується на основі масиву з автоматичним збільшенням ємності. При досягненні межі поточної місткості відбувається виділення

нового масиву подвоєного розміру, копіювання всіх наявних елементів та заміна посилання. Словник ( $Dictionary\langle K, V \rangle$ ) – це хеш-таблиця, яка асоціює ключі з відповідними значеннями. Зі збільшенням кількості елементів до критичного порогу виконується виділення нового масиву bucket-осередків та оновлення структури зберігання. Обидві структури дозволяють динамічне збільшення кількості елементів за рахунок виділення внутрішніх буферів більших за фактичний об'єм елементів. Для контейнерів групування може проводитись за *ємністю* (розміром виділеного під внутрішні буфери масиву або хеш-таблиці)  $CollectionCapacity$  та за *фактичною кількістю* збережених елементів

$CollectionElementsCount$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} CollectionElementsCount: O \rightarrow N \\ CollectionCapacity: O \rightarrow N \\ Val_{fl}: O_t \rightarrow O \\ \phi(t, fl) = \frac{1}{|O_t|} \sum_{o \in O_t} \frac{CollectionElementsCount(Val_{fl}(o))}{CollectionCapacity(Val_{fl}(o))} \\ 0 < \phi(t, fl) \leq 1 \end{array} \right.$$

Отримане відношення дозволяє сформулювати правило для зменшення розміру колекції:

$$\begin{array}{l} \text{IF } t \in T_{inv} \wedge fl \in FL_{col}(t) \wedge \phi(t, fl) \leq \\ \tau_{cap} \text{ THEN Recommend(ReduceCapacity}(t, fl)) \end{array}$$

**Оцінка вартості зберігання інформації у хеш-колекції типу словник ( $Dictionary\langle K, V \rangle$ ).** Хеш-колекції типу словник використовують службові структури  $W$  (масиви  $buckets$ ,  $entries$ , допоміжні поля  $views$  та об'єкти представлень ключів/значень) для зберігання інформації  $U$ . Цей підхід потребує створення додаткових об'єктів, які можуть займати більший обсяг пам'яті ніж збережені значення для невеликої кількості елементів. На основі співвідношення між обсягом корисної інформації  $U$ , та загальним обсягом  $M$  оцінюється вартість збереження корисної інформації  $\eta$ :

$$\left\{ \begin{array}{l} Collection_{dict}: T \rightarrow \{true, false\} \\ T_{dict} = \{t \in T \mid Collection_{dict}(t)\}, \\ O_t = \{o \in O \mid G(o) = t\}, t \in T_{dict} \\ U(o) = \sum_{i=1}^{CollectionElementsCount(o)} (S(key_i) + S(value_i)) \\ W(o) = S(o) + S(buckets(o)) + S(entries(o)) + S(views(o)) \\ M(o) = W(o) + U(o) \\ \eta(o) = \frac{U(o)}{M(o)} \\ \eta_t = \frac{\sum_{o \in O_t} U(o)}{\sum_{o \in O_t} M(o)}, 0 < \eta(o) \leq 1 \end{array} \right.$$

При зростанні кількості елементів в колекції, додатковий об'єм пам'яті  $W$  займає меншу частку. Правило експертної системи спрацьовує для колекцій з невеликою кількістю елементів і рекомендує замінити хеш колекцію на колекцію з фіксованою кількістю елементів:

$$\text{IF } \eta_t \leq \eta_{min} \text{ THEN Recommend(ReplaceWithNonHashCollection}(t))$$

**Оцінка потенціалу зменшення використання пам'яті при стисканні масивів байтів.** Стискання масивів байтів у пам'яті дозволяє усунути надлишковість використання пам'яті без втрати даних, що дозволяє скоротити споживання пам'яті, підвищити щільність зберігання, тому доцільною є оцінка застосування алгоритмів стискання  $Zip(o)$  для  $O_{t_b}$  об'єктів типу  $System.Byte[]$ . Введемо параметр  $L_{min}$ , який відповідає мінімальній довжині масиву  $C(o)$  для ефективної роботи алгоритму стискання:

$$\left\{ \begin{array}{l} C: O_{t_b} \rightarrow N \\ L_{min} \in N \\ O_{t_b}^* = \{o \in O_{t_b}; C(o) \geq L_{min}\} \\ Zip: O_{t_b}^* \rightarrow O_{t_b}^{zip} \\ INFO(o) = INFO(Zip(o)) \\ C(o) \geq C(Zip(o)) \end{array} \right.$$

Для оцінювання операції застосуємо метрику ефективності стискання, яка обчислюється як відношення суми довжин всіх наявних масивів з довжиною більшою, або рівною, заданому пороговому значенню з використанням компресії, до суми оригінальних довжин, що використовувалися до застосування алгоритмів компресії:

$$\left\{ \begin{array}{l} Ratio_{compress} = \frac{\sum_{o \in O_{t_b}^*} c(zip(o))}{\sum_{o \in O_{t_b}^*} c(o)} \\ 0 < Ratio_{compress} \leq 1 \end{array} \right.$$

Отримана метрика дозволяє сформулювати експертне правило по застосуванню алгоритмів компресії:

$$\begin{array}{l} \text{IF } |O_{t_b}^*| > 0 \wedge Ratio_{compress} \leq \\ \tau_{zip} \text{ THEN Recommend(ApplyCompression}(t_b)) \end{array}$$

**Виявлення надмірного споживання пам'яті через надлишкову кількість блоків синхронізації.** Для забезпечення потокобезпечного доступу до даних використовується сегментована синхронізація у колекціях, які підтримують одночасний доступ з декількох потоків виконання. Кількість блоків синхронізації  $Locks_{cd}$  визначає гранулярність блокувань і впливає на накладні витрати пам'яті. У середовищі .NET тип  $ConcurrentDictionary<K,V>$  реалізує потокобезпечний одночасний доступ до елементів колекції словника. За замовченням, кількість блоків синхронізації дорівнює кількості обчислювальних ядер системи, і зростає з кількістю елементів всередині колекції:

$$\left\{ \begin{array}{l} G(O): O \rightarrow T, O_t = o \in O \mid G(o) = t \\ IsConcurrentDict: T \rightarrow \{true, false\} \\ T_{cd} = \{t \in T \mid IsConcurrentDict(t)\} \\ Locks_{cd}: O_{cd} \rightarrow N \\ KV: T_{cd} \rightarrow K \times V, KV(t_{cd}) = (K, V), t_{cd} \subseteq T_{cd} \end{array} \right.$$

В разі, коли кількість екземплярів словників  $O_{t_{K,V}}$  однакового типу ( $K \times V$ ) перевищує порогове значення  $N_{cd}$ , ймовірність інтенсивного одночасного доступу з боку великої кількості потоків до кожного окремого словника зменшується, тому рівень гранулярності більший за  $L_{max}$  не є виправданим:

$$\begin{cases} N_{cd} \in N, L_{max} \in N \\ O_{K,V} = O_{t_{K,V}}, t_{K,V} \in T_{cd} \wedge KV(t_{K,V}) = (K, V) \\ O_{K,V}^{locks} = \{o \in O_{K,V} \mid Locks_{cd}(o) > L_{max}\} \end{cases}$$

Отримані підмножини для визначених типів ( $K \times V$ ) містять лише екземпляри об'єктів словників з більшою гранулярністю блокувань і дозволяють сформулювати правило для зменшення гранулярності:

$$IF t_{K,V} \in T_{cd} \wedge |O_{K,V}^{locks}| > N_{cd}$$

**THEN** *Recommend(ReduceConcurrency(K, V)).*

### Архітектура rule-based експертної системи

**Загальна структура.** Розроблена експертна система побудована за класичною архітектурою продукційної системи, що включає три основні компоненти: база фактів, база знань та машина виведення. База фактів містить дані, отримані зі знімка пам'яті, що представлені у формалізованому вигляді: множини об'єктів  $O$ , типів  $T$ , групувань  $O_t$ ,  $O_{t,v}$  тощо. База знань складається з набору правил виду «ЯКЩО ситуація, ТО дія», де умови сформульовано на основі введених понять про об'єкти і їх групи, а дії відповідають рекомендаціям, що призводять до оптимізації використання пам'яті. Машина виведення реалізує алгоритм прямого виведення для аналізу поточної ситуації, до наявних фактів застосовуються релевантні правила та здійснюється генерація висновків.

Правила в системі можна розподілити на дві групи: правила виявлення проблеми та правила рекомендацій. Перші визначають, чи присутній у знімку пам'яті певний сценарій неефективності, другі – яку саме пораду надати розробнику. Наприклад, правило виявлення може бути сформульоване так: «Якщо знайдено більш ніж 1000 рядків типу *System.String* з однаковим значенням, яке повторюється понад 100 разів кожне, то зафіксувати випадок дублювання рядкових констант» Це правило спрацьовує на основі аналізу груп  $O_{string,v}$ , отриманих при групуванні рядків за значенням  $v$ . Правило рекомендації, пов'язане з ним, можна записати в такий спосіб: «Якщо в системі виявлено значне дублювання незмінних рядків, рекомендувати застосувати інтернування рядків або кешування їхніх значень в єдиному екземплярі (пул об'єктів).» Іншим прикладом є формулювання правила виявлення для неефективної колекції, яке можна сформулювати так: «Якщо об'єкт типу *Dictionary* має фактичне заповнення менше 20% від розміру його внутрішнього буфера, позначити цей словник як кандидата для здійснення оптимізації». Тоді відповідна рекомендація матиме таке формулювання: «Розглянути можливість зменшення початкової ємності словника або запропонувати використан-

ня альтернативної структури (наприклад, списку або масиву), якщо обсяг даних невеликий».

Таким чином, продукційна система послідовно аналізує факти, отримані зі знімка пам'яті, співставляючи їх із умовами правил. При виконанні умови спрацьовує права частина правила – формування нового факту (виявленої проблеми) або безпосередньо рекомендації. Важливо, що правила можуть мати пріоритети або пороги спрацювання, щоб знизити кількість хибно-спрацьовуючих порад. Знання для правил були отримані на основі аналізу характеристик промислових .NET систем з використанням бібліотеки ClrMD для доступу до внутрішньої структури пам'яті.

**Джерела знань та інженерія бази правил.** Правила створено на основі декількох джерел знань: (а) аналіз коду та статистики утиліти для дослідження знімків пам'яті, (б) публікації авторів з результатами експериментів, та (в) загальні принципи оптимізації з області розробки ПЗ. Інструментальним базисом для (а) став програмний додаток, що виконує автоматизований збір статистики знімка пам'яті (використовує *Microsoft.Diagnostics.Runtime*, відому як ClrMD). Цей додаток генерує звіти на які і спираються умови правил.

**Аналіз результатів.** Запропонована архітектура експертної системи на основі правил була апробована на реальних знімках пам'яті великого промислового веб-додатку (20–120 ГБ кожен). Система успішно виявила типові проблеми, підтверджуючи дані попередніх досліджень. Зокрема, було знайдено і рекомендовано до усунення значне дублювання рядкових даних (до 43% рядків – дублікати) [22], що вказує на потребу впровадження кешування константних строкових значень. Також ідентифіковано численні випадки неефективного використання колекцій: словники із заповненням <20%, масиви з великою кількістю невикористаних елементів, тисячі порожніх масивів та списків. Кожна така знахідка супроводжувалась конкретною порадою, як покращити код або конфігурацію. Наприклад, для великого словника налаштувань було запропоновано зменшити його розмір або розбити на декілька менших словників за категоріями, оскільки 80% його bucket-осередків лишалися порожніми. В іншому випадку масив об'єктів був заповнений менш ніж на 10%, і система порадила перейти до використання структури даних список, який збільшується в разі додавання елементів, замість використання масиву фіксованого обсягу.

Отримані рекомендації були надані розробникам додатку, що підлягав тестуванню. Експериментальні оцінки показали, що реалізація цих рекомендацій дозволила знизити пікове використання пам'яті на 15–30% в залежності від сценарію використання, що є суттєвим покращенням продуктивності без додаткових апаратних ресурсів. Таким чином, правило-орієнтована експертна система довела свою ефективність як інструмент аналізу і оптимізації пам'яті програмних додатків.

**Висновки.** У роботі розглянуто підхід до аналізу ефективності використання пам'яті комп'ютеру під час роботи програмного додатку. Розроблено модель представлення знімку пам'яті комп'ютера як множини об'єктів, надано опис операції групування об'єктів за типами і значеннями, визначено показники надмірного використання

пам'яті та ефективності збереження інформації. Виявлено та надано формалізований опис типових ситуацій надмірного використання пам'яті, зокрема ситуацій, пов'язаних з дублюванням даних та надлишковим резервуванням пам'яті для зберігання інформації.

Запропоновано архітектуру експертної системи на основі продукційних правил, яка здійснює аналіз знімків пам'яті для виявлення ситуацій надмірного використання. Надано формулювання продукційних правил та побудовано базу знань, що охоплює інтерпретацію знімків пам'яті, властивості типів (незмінність), статистичні показники алокації. Експертна система на основі правил була апробована на реальних знімках пам'яті великого промислового веб-додатку, реалізація рекомендацій експертної системи дозволила знизити пікове використання пам'яті на 15–30% в залежності від сценарію використання.

Запропонований підхід є незалежним від конкретної реалізації програмного коду та базується виключно на фактичному стані пам'яті, зафіксованому у знімку.

Перспективи подальших досліджень можуть бути спрямовані на розширення бази правил для врахування інших типів неефективності (наприклад, надлишкове дублювання коду або обчислень), інтеграцію статистичних методів і машинного навчання для автоматичного налаштування порогів спрацювання правил, а також проведення масштабних експериментів на різних платформах (Java, C++) для перевірки універсальності підходу. Розроблена рекомендаційна система є основою інструменту, що підвищує ефективність роботи програмних додатків шляхом глибокого аналізу використання пам'яті під час їх роботи та експертної оцінки знайдених аномалій.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Mitikov, N. and Guk, N. (2024) 'Investigation of software application performance issues', *Mathematical and computer modelling. Series: Technical sciences*, 25, pp. 22–36. doi:10.32626/2308-5916.2024-25.22-36.
2. Nataliia, H. and Nikolay, M. (2024) 'Modern problems of Anomaly Identification in enterprise systems', *System technologies*, 5(154), pp. 146–153. doi:10.34185/1562-9945-5-154-2024-15.
3. Lakhno, V., Tkach, Y., et al. (2016) 'Development of adaptive expert system of information security using a procedure of clustering the attributes of anomalies and cyber attacks', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(9 (84)), pp. 32–44. doi:10.15587/1729-4061.2016.85600.
4. Lakhno, V. et al. (2016) 'Design of adaptive system of detection of cyber-attacks, based on the model of logical procedures and the coverage matrices of features', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(9(81)), p. 30. doi:10.15587/1729-4061.2016.71769.
5. Protsiuk, V. (2024) 'Anomaly detection models of for sensor data of oil and gas well drilling process under uncertainty', *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 333(2), pp. 177–188. doi:10.31891/2307-5732-2024-333-2-29.
6. Meleshko, Y. et al. (2024) 'Development a set of mathematical models for anomaly detection in high-load complex computer systems', *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4 (132)), pp. 14–25. doi:10.15587/1729-4061.2024.316779.

7. Semenov, S. *et al.* (2022) ‘Devising a procedure for defining the general criteria of abnormal behavior of a computer system based on the improved criterion of uniformity of input data samples’, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6(4 (120)), pp. 40–49. doi:10.15587/1729-4061.2022.269128.
8. Mitikov, N.Y. and Guk, N.A. (2023) ‘Detection of software problems based on memory dump analysis’, *Problems of applied mathematics and mathematic modeling*, pp. 171–178. doi:10.15421/322318.
9. Mitikov, N.Y. and Guk, N.A. (2024) ‘Modeling and automation of the process for detecting duplicate objects in memory snapshots’, *Herald of Advanced Information Technology*, 7(2), pp. 147–157. doi:10.15276/hait.07.2024.10.
10. Guk, N., Mitikov, N. and Selivyorstova, T. (2024) ‘Detecting extraordinary application memory use by analyzing memory screenshots’, *Science and Technology Today* [Preprint], (10(38)). doi:10.52058/2786-6025-2024-10(38)-39-49.
11. Mitikov, N., & Guk, N. (2025). Enhancing collection performance in software through Memory Snapshot Analysis and mathematical modeling. *Modern Problems of Modeling*, (27), 109–122. <https://doi.org/10.33842/2313-125x-2025-19-109-122>
12. Mitikov, M. (2025). Mathematical model of information representation in memory for software performance analysis. *Modern Problems of Modeling*, (28), 96–107. <https://doi.org/10.33842/2313-125x-2025-30-96-107>

Received 03.11.2025.  
Accepted 17.11.2025.

### ***Architecture of an expert system for analysing memory snapshots***

*This paper proposes a rule-based expert system architecture designed to analyse software application memory snapshots in order to identify and eliminate inefficient memory usage. The system uses production rules based on knowledge about object types and their properties (in particular, immutability), allocation statistics, and object distribution in memory. A formal model for representing a memory snapshot as a set of objects with certain attributes has been developed, and criteria for identifying duplicates of immutable information and excessive memory reservation have been introduced. Mechanisms for grouping objects by type and value to diagnose data duplication are described, as well as methods for identifying inefficient allocations, in particular, excessive data structure size relative to their useful content. The system generates recommendations in the form of instructions for code optimisation, namely the implementation of caching or object pools, redistribution of data structures, etc. The system evaluates the expected memory savings. Mathematical formalizations are provided to describe the input data, grouping operations, filtering, and object comparison.*

*Keywords: expert system, memory snapshot, data duplication, inefficient allocations, production rules, object pool, memory optimisation.*

**Гук Наталія Анатоліївна** – завідувачка кафедри комп’ютерних технологій, доктор фізико-математичних наук, професорка, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, huk\_n@fpm.dnu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7937-1039

**Мітіков Микола Юрійович** – аспірант кафедри прикладної математики, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, mitikov.m22@fpm.dnu.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-1297-5676

**Huk Nataliia** - Head of the Department of Computer Technologies, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Oles Honchar Dnipro National University, huk\_n@fpm.dnu.edu.ua, ORCID ID: 0000-0001-7937-1039

**Mitikov Nikolay** - PhD student, Department of Applied Mathematics, Oles Honchar Dnipro National University, mitikov.m22@fpm.dnu.edu.ua, ORCID ID: 0009-0002-1297-5676

Т.В. Селівьорстова, Д.Г. Зеленцов, Я.В. Романько, І.Р. Тесленко

**СТОХАСТИЧНА МЕРЕЖЕВО-ЧАСОВА МОДЕЛЬ PERT/CPM  
З ІМОВІРНІСНИМИ ПЕРЕРОБКАМИ  
ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ СТРОКІВ ІТ-ПРОЄКТИ**

*Анотація.* У статті розглянуто задачу імовірнісного оцінювання строків завершення ІТ-проектів за умов невизначеності тривалостей робіт і повторних циклів доопрацювання результатів після контрольних перевірок (*rework*). Запропоновано стохастичну мережево-часову модель на основі PERT/CPM, у якій базові тривалості робіт задаються триточковими оцінками PERT, а механізм переробок формалізовано через ймовірність непроходження контрольного етапу та випадкову тривалість переробки (з можливістю врахування ефекту навчання). Для отримання розподілу часу завершення проекту застосовано імітаційне моделювання методом Монте-Карло з мережевим розрахунком ранніх термінів старту/завершення. Обчислюються перцентильні строки завершення (P50/P80/P90), ймовірність виконання заданого дедлайну та показники критичності робіт і чутливості параметрів (*tornado*-аналіз). Запропонований підхід забезпечує більш адекватне оцінювання календарних ризиків порівняно з детермінованими планами та може бути використаний для обґрунтування буферів і пріоритетів управління якістю й ризиками в ІТ-проектах.

*Ключові слова:* PERT, CPM, стохастичне планування, імітаційне моделювання, Монте-Карло, переробки (*rework*), ризик дедлайну, критичний шлях, *criticality index*, чутливість.

**Вступ.** Сучасні ІТ-проекти характеризуються високою динамічністю вимог, складною взаємодією команд і підсистем, а також істотною невизначеністю щодо фактичної тривалості робіт. Навіть за наявності формалізованого календарного плану типу CPM/PERT, реальні строки виконання часто відхиляються від детермінованих оцінок через повторні цикли уточнення, виправлень і повторного приймання результатів. До найбільш поширених причин належать переробки після code review, невдалі прогони тестування (QA), повторні ітерації користувацького приймання (UAT), а також додаткові перевірки безпеки й якості. Унаслідок цього, проектні графіки, побудовані на фіксованих тривалостях робіт, здебільшого недооцінюють ризик зриву дедлайнів і не дають коректних імовірнісних характеристик завершення.

Класичний підхід PERT передбачає моделювання тривалостей робіт випадковими величинами (зокрема за триточковими оцінками), а CPM забезпечує обчислення критичного шляху та резервів часу в мережевому графі залежностей. Проте у традиційних

постановках ці методи, як правило, не враховують явний механізм зворотного зв'язку «виконання–перевірка–переробка», який є типовим для процесів розроблення програмного забезпечення. Практика DevOps/CI/CD та сучасні стандарти якості приводять до того, що результат кожної значущої активності проходить одну або кілька контрольних точок, де з певною ймовірністю повертається на доопрацювання. Такий механізм породжує стохастичні цикли переробок, що змінюють як середнє значення тривалості робіт, так і форму розподілу строків завершення проєкту, зокрема верхні перцентилі (P80/P90), які є критично важливими для управління зобов'язаннями та контрактними дедлайнами.

У зв'язку з цим актуальною є побудова математичної моделі, яка поєднує мережеве планування CPM/PERT із імовірнісним описом переробок, дозволяючи перейти від “точкової” дати завершення до повного розподілу строків і оцінки ризику дедлайну. У даній роботі пропонується стохастична мережево-часова модель, у якій для кожної роботи базова тривалість задається PERT-розподілом, а процес переробок після контрольної перевірки моделюється геометричною кількістю повторів та випадковими тривалостями доопрацювання. Такий підхід дає змогу адекватно описувати реальні проєктні цикли та формувати імовірнісні характеристики завершення, включно з оцінюванням перцентильних строків (P50/P80/P90) і ймовірності виконання заданого дедлайну.

**Метою статті** є розроблення та дослідження стохастичної PERT/CPM-моделі з імовірнісними переробками для оцінювання строків завершення ІТ-проєктів, а також формування обчислювальної процедури отримання розподілу часу завершення на основі імітаційного моделювання.

### **Постановка задачі та припущення моделі.**

#### **1. Мережеве подання ІТ-проєкту**

Розглядається ІТ-проєкт, структура якого задається орієнтованим ациклічним графом (мережевою моделлю)

$$G = (V, E),$$

де  $V = \{1, 2, \dots, n\}$  – множина робіт (активностей), а  $E \subseteq V \times V$  – множина технологічних залежностей типу *finish-to-start*. Наявність дуги  $(i, j) \in E$  означає, що робота  $j$  може розпочатися лише після завершення роботи  $i$ . Така постановка відповідає класичним підходам CPM/PERT і використовується для розрахунку раних термінів старту/завершення та критичного шляху.

Для кожної роботи  $i \in V$  вводяться моменти старту  $S_i$  та завершення  $F_i$ , а також її тривалість (в подальшому – стохастична)  $T_i$ . Початок проєкту задається як  $S_0 = 0$ , а час завершення проєкту визначається моментом завершення останньої (за топологічним порядком) роботи:

$$T_{\text{proj}} = \max_{i \in V} F_i.$$

#### **2. Стохастичні тривалості базового виконання робіт (PERT-компонента).**

Невизначеність тривалості виконання робіт моделюється випадковими величинами. Нехай  $D_i$  – базова тривалість виконання роботи  $i$  без урахування можливих переробок. У PERT-підході  $D_i$  параметризується триточковими оцінками:

$$(a_i, m_i, b_i),$$

де  $a_i$  – оптимістична,  $m_i$  – найбільш імовірна,  $b_i$  – песимістична тривалість. У загальному вигляді припускається, що

$$D_i \sim \text{PERT}(a_i, m_i, b_i),$$

або інший близький за формою розподіл (наприклад трикутний), що дозволяє відображати асиметрію та обмеженість тривалостей у практиці планування.

### 3. Механізм контрольних перевірок та переробок (rework).

Особливістю IT-проектів є наявність контрольних точок якості/приймання (код-рев'ю, QA-тестування, UAT, acceptance), після яких результат може бути повернений на доопрацювання. Для відображення цього механізму для кожної роботи  $i$  вводиться множина контрольних етапів (gate):

$$g \in \{1, 2, \dots, G_i\}.$$

Кожен gate  $g$  для роботи  $i$  характеризується:

- $p_{i,g} \in [0,1]$  – ймовірністю непроходження gate (виникнення переробки);
- $R_{i,g}$  – випадковою тривалістю однієї переробки, яка також може задаватися триточковими оцінками  $(a_{i,g}^r, m_{i,g}^r, b_{i,g}^r)$ .

Нехай  $N_{i,g}$  – кількість переробок, спричинених gate  $g$  для роботи  $i$ . Приймається геометрична модель повторів (кількість невдач до першого успішного проходження перевірки):

$$\mathbb{P}(N_{i,g} = n) = (1 - p_{i,g}) p_{i,g}^n, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

тобто

$$N_{i,g} \sim \text{Geom}(1 - p_{i,g}).$$

Ця постановка відображає повторюваний цикл «виконання/перевірка/переробка», який з певною ймовірністю завершується успішним прийманням.

### 4. Ефект навчання в переробках.

У практиці розроблення програмного забезпечення повторні переробки зазвичай виконуються швидше (внаслідок уточнення вимог, локалізації дефектів, стабілізації оточення). Для врахування цього вводиться параметр навчання  $\alpha_{i,g} \in (0,1]$ , який масштабує тривалість  $k$ -го повтору:

$$R_{i,g,k} = \alpha_{i,g}^{k-1} R_{i,g}, \quad k = 1, 2, \dots$$

де  $R_{i,g,k}$  – тривалість  $k$ -го циклу переробки. При  $\alpha_{i,g} = 1$  ефект навчання відсутній; при  $\alpha_{i,g} < 1$  повторні переробки мають меншу очікувану тривалість.

### 5. Ефективна тривалість роботи та правила мережевого розрахунку.

Ефективна тривалість роботи  $i$  визначається як сума базової тривалості та тривалостей переробок на всіх gate:

$$T_i = D_i + \sum_{g=1}^{G_i} \sum_{k=1}^{N_{i,g}} R_{i,g,k}.$$

У випадку моделі навчання замість  $R_{i,g,k}$  використовується залежність з  $\alpha_{i,g}$ , наведена вище.

Подальший розрахунок календарних характеристик у мережі виконується за стандартними правилами СРМ (прямий прохід), але з випадковими  $T_i$ :

$$S_i = \max_{(j,i) \in E} F_j, F_i = S_i + T_i.$$

причому для робіт без попередників приймається  $S_i = 0$ .

### 6. Мета моделювання та вихідні показники.

Метою є отримання імовірнісної оцінки строків завершення проєкту з урахуванням стохастичності базових тривалостей і циклів переробок. Основними вихідними показниками є:

1) Розподіл часу завершення проєкту  $T_{\text{proj}}$ .

2) Перцентильні оцінки строків:

$$P_q(T_{\text{proj}}), q \in \{0.5, 0.8, 0.9\},$$

що відповідають  $P50$ ,  $P80$ ,  $P90$  датам завершення.

3) Ймовірність виконання дедлайну  $T^*$ :

$$\mathbb{P}(T_{\text{proj}} \leq T^*).$$

4) (За необхідності) показники критичності робіт, зокрема частота перебування роботи на критичному шляху (criticality index), що дозволяє ідентифікувати роботи-драйвери ризику.

### 7. Основні припущення та обмеження.

Для забезпечення формальної коректності та обчислювальної реалізованості моделі приймаються такі припущення:

1) Ациклічність мережі. Граф  $G$  є DAG; залежності робіт не змінюються протягом моделювання.

2) Незалежність спроб проходження gate. Кожна спроба проходження gate  $g$  для роботи  $i$  є незалежною, а ймовірність непроходження  $p_{i,g}$  є сталою в межах моделювання.

3) Незалежність тривалостей. Величини  $D_i$ ,  $R_{i,g,k}$ , та  $N_{i,g}$  розглядаються як незалежні (або умовно незалежні за фіксованих параметрів), якщо не зазначено інше.

4) Однорідність переробок одного типу. Для фіксованих  $i$ ,  $g$  тривалості  $R_{i,g,k}$  мають однаковий базовий розподіл (з можливим масштабуванням за  $\alpha_{i,g}$ ).

5) Обрізання надмірних повторів (практичне обмеження). Для уникнення нерелістичних “нескінченних” циклів може вводиться максимальна кількість переробок  $N_{\max}$  gate:

$$N_{i,g} \leftarrow \min\{N_{i,g}, N_{\max}\}.$$

б) Ресурсні обмеження не враховано. У базовій постановці не моделюються обмеження ресурсів (людських/обчислювальних), мультизадачність та черги; у розділі висновків можуть бути наведені напрями розширення моделі на RCPSP-подібні постановки.

Єдина шкала часу. Усі тривалості вимірюються в одних одиницях (дні/тижні); за потреби календаризація виконується після отримання  $T_{\text{proj}}$ .

**Стохастична мережево-часова модель PERT/CPM з імовірнісними переробками.**

### 1. Позначення та загальна структура моделі.

Нехай IT-проект заданий мережею  $G = (V, E)$ ,  $V = \{1, \dots, n\}$ . Для кожної роботи:

- $D_i$  – базова тривалість виконання роботи без переробок;
- $N_{i,g}$  – кількість переробок, викликаних контрольним етапом (gate)  $g \in \{1, \dots, G_i\}$ ;
- $R_{i,g,k}$  – тривалість  $k$ -го циклу переробки на gate  $g$ .

Ефективна тривалість роботи з урахуванням переробок задається

$$T_i = D_i + \sum_{g=1}^{G_i} \sum_{k=1}^{N_{i,g}} R_{i,g,k}.$$

Таким чином, стохастика моделі формується двома складовими:

- невизначеністю базових тривалостей  $D_i$ ;
- випадковим процесом повторних переробок, параметризованим  $(p_{i,g}, R_{i,g})$  та, за

потреби,  $\alpha_{i,g}$ .

### 2. PERT-модель базових тривалостей робіт.

Для кожної роботи  $i$  базова тривалість  $D_i$  задається триточковою оцінкою  $(a_i, m_i, b_i)$ . У рамках PERT припускається

$$D_i \sim \text{PERT}(a_i, m_i, b_i).$$

а математичне сподівання та дисперсія (PERT-наближення) визначаються:

$$\mathbb{E}[D_i] = \frac{a_i + 4m_i + b_i}{6}, \quad \text{Var}(D_i) = \left(\frac{b_i - a_i}{6}\right)^2.$$

За необхідності допускається використання альтернативних розподілів (наприклад трикутного), однак у подальшому викладі використовується стандартна PERT-параметризація.

### 3. Геометрична модель кількості переробок після gate.

Після завершення роботи  $i$  на кожному контрольному етапі  $g$  результат або приймається, або повертається на доопрацювання. Вводиться параметр

$$p_{i,g} \in [0,1),$$

що означає ймовірність непроходження gate  $g$  (тобто необхідність переробки).

Кількість переробок  $N_{i,g}$  моделюється геометричним розподілом (кількість невдач до першого успіху):

$$\mathbb{P}(N_{i,g} = n) = (1 - p_{i,g}) p_{i,g}^n, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

тобто

$$N_{i,g} \sim \text{Geom}(1 - p_{i,g}).$$

Звідси випливають моменти:

$$\mathbb{E}[N_{i,g}] = \frac{p_{i,g}}{1 - p_{i,g}}, \quad \text{Var}(N_{i,g}) = \frac{p_{i,g}}{(1 - p_{i,g})^2}.$$

Для запобігання нереалістично великим кількостям повторів у прикладних розрахунках може застосовуватися обрізання:

$$N_{i,g}^{\text{tr}} = \min\{N_{i,g}, N_{\max}\}.$$

#### 4. Модель тривалості переробок.

Тривалість одного циклу переробки на gate  $g$  для роботи  $i$  задається випадковою величиною  $R_{i,g}$ , параметризованою триточковою оцінкою  $(a_{i,g}^r, m_{i,g}^r, b_{i,g}^r)$ :

$$R_{i,g} \sim \text{PERT}(a_{i,g}^r, m_{i,g}^r, b_{i,g}^r),$$

а

$$\mathbb{E}[R_{i,g}] = \frac{a_{i,g}^r + 4m_{i,g}^r + b_{i,g}^r}{6}, \quad \text{Var}(R_{i,g}) = \left( \frac{b_{i,g}^r - a_{i,g}^r}{6} \right)^2.$$

Надалі припускається, що  $R_{i,g,k} \stackrel{iid}{\sim} R_{i,g}$  для фіксованих  $i, g$ .

#### 5. Ефект навчання в циклах переробок.

Для врахування скорочення тривалості повторних переробок вводиться параметр навчання

$$\alpha_{i,g} \in (0,1].$$

Тоді тривалість  $k$ -го повтору моделюється як

$$R_{i,g,k} = \alpha_{i,g}^{k-1} R_{i,g}, \quad k = 1, 2, \dots$$

і сумарний вклад переробок на gate  $g$  становить

$$W_{i,g} = \sum_{k=1}^{N_{i,g}} \alpha_{i,g}^{k-1} R_{i,g}.$$

Отже, ефективна тривалість роботи:

$$T_i = D_i + \sum_{g=1}^{G_i} W_{i,g} = D_i + \sum_{g=1}^{G_i} R_{i,g} \sum_{k=0}^{N_{i,g}-1} \alpha_{i,g}^k = D_i + \sum_{g=1}^{G_i} R_{i,g} \frac{1 - \alpha_{i,g}^{N_{i,g}}}{1 - \alpha_{i,g}}.$$

При  $\alpha_{i,g} = 1$  формула переходить у випадок без навчання:  $W_{i,g} = \sum_{k=1}^{N_{i,g}} R_{i,g,k}$ .

## 6. Математичне сподівання ефективної тривалості роботи.

За умов незалежності  $D_i$ ,  $N_{i,g}$  та  $R_{i,g}$  отримуємо сподівання.

### 6.1. Випадок без навчання ( $\alpha_{i,g} = 1$ )

Оскільки

$$T_i = D_i + \sum_{g=1}^{G_i} \sum_{k=1}^{N_{i,g}} R_{i,g,k},$$

то

$$\mathbb{E}[T_i] = \mathbb{E}[D_i] + \sum_{g=1}^{G_i} \mathbb{E}[N_{i,g}] \mathbb{E}[R_{i,g}] = \mathbb{E}[D_i] + \sum_{g=1}^{G_i} \frac{p_{i,g}}{1-p_{i,g}} \mathbb{E}[R_{i,g}].$$

Таким чином,

$$\mathbb{E}[T_i] = \mathbb{E}[D_i] + \sum_{g=1}^{G_i} \frac{p_{i,g}}{1-p_{i,g}} \mathbb{E}[R_{i,g}].$$

### 6.2. Випадок з навчанням ( $\alpha_{i,g} \in (0,1]$ )

Тоді

$$T_i = D_i + \sum_{g=1}^{G_i} R_{i,g} \frac{1-\alpha_{i,g}^{N_{i,g}}}{1-\alpha_{i,g}}.$$

Для  $N_{i,g} \sim \text{Geom}(1-p_{i,g})$  справедливо:

$$\mathbb{E}[\alpha_{i,g}^{N_{i,g}}] = \sum_{n=0}^{\infty} \alpha_{i,g}^n (1-p_{i,g}) p_{i,g}^n = \frac{1-p_{i,g}}{1-\alpha_{i,g} p_{i,g}}, \quad \alpha_{i,g} p_{i,g} < 1.$$

Тоді

$$\mathbb{E}\left[\frac{1-\alpha_{i,g}^{N_{i,g}}}{1-\alpha_{i,g}}\right] = \frac{1-\mathbb{E}[\alpha_{i,g}^{N_{i,g}}]}{1-\alpha_{i,g}} = \frac{p_{i,g}}{1-\alpha_{i,g} p_{i,g}}.$$

Отже,

$$\mathbb{E}[T_i] = \mathbb{E}[D_i] + \sum_{g=1}^{G_i} \frac{p_{i,g}}{1-\alpha_{i,g} p_{i,g}} \mathbb{E}[R_{i,g}].$$

що узагальнює формулу без навчання (при  $\alpha_{i,g} \rightarrow 1$ ).

## 7. Дисперсія ефективної тривалості (наближена оцінка).

Для випадку без навчання та незалежних компонент використовується стандартна формула для випадкової суми:

$$\text{Var}\left(\sum_{k=1}^{N_{i,g}} R_{i,g,k}\right) = \mathbb{E}[N_{i,g}] \text{Var}(R_{i,g}) + \text{Var}(N_{i,g}) (\mathbb{E}[R_{i,g}])^2.$$

Тоді

$$\text{Var}(T_i) \approx \text{Var}(D_i) + \sum_{g=1}^{G_i} \left[ \mathbb{E}[N_{i,g}] \text{Var}(R_{i,g}) + \text{Var}(N_{i,g}) (\mathbb{E}[R_{i,g}])^2 \right],$$

або з урахуванням  $\mathbb{E}[N_{i,g}]$  та  $\text{Var}(N_{i,g})$ :

$$\text{Var}(T_i) \approx \text{Var}(D_i) + \sum_{g=1}^{G_i} \left[ \frac{P_{i,g}}{1-P_{i,g}} \text{Var}(R_{i,g}) + \frac{P_{i,g}}{(1-P_{i,g})^2} (\mathbb{E}[R_{i,g}])^2 \right].$$

Наведена оцінка застосовується для аналітичної інтерпретації впливу параметрів переробок на варіативність строків.

### 8. Стохастичні рівняння СРМ та час завершення проєкту.

Для реалізації мережевого розрахунку вводяться ранні моменти старту/фінішу:

$$S_i = \max_{(j,i) \in E} F_j, \quad F_i = S_i + T_i.$$

Тоді час завершення проєкту:

$$T_{\text{proj}} = \max_{i \in V} F_i.$$

Еквівалентно, з позиції шляхів у мережі:

$$T_{\text{proj}} = \max_{\pi \in \Pi} \sum_{i \in \pi} T_i,$$

де  $\Pi$  – множина всіх шляхів від стартових до фінальних робіт. На відміну від детермінованої СРМ-моделі, в стохастичному випадку критичний шлях може змінюватися між реалізаціями (симуляціями), що зумовлює потребу в імовірнісних показниках критичності та аналізі чутливості.

### 9. Формулювання задачі імовірнісного оцінювання строків.

Задача полягає в обчисленні (або оцінюванні) розподілу  $T_{\text{proj}}$  та функціоналів цього розподілу:

- перцентильних оцінок  $P_q(T_{\text{proj}})$ , зокрема  $q = 0.5, 0.8, 0.9$ ;
- ймовірності виконання дедлайну  $T^* : \mathbb{P}(T_{\text{proj}} \leq T^*)$ .

Через наявність оператора максимуму по шляхах та стохастичних переробок замкнена аналітична форма розподілу  $T_{\text{proj}}$  у загальному випадку відсутня, тому у наступному розділі розглядається імітаційна процедура Монте-Карло для оцінювання зазначених показників, а також метрики criticality index і аналіз чутливості параметрів  $(p_{i,g}, \mathbb{E}[R_{i,g}], \alpha_{i,g})$ .

### Імітаційне моделювання та обговорення результатів.

#### 1. Мета та загальна схема імітаційного оцінювання.

Оскільки в запропонованій стохастичній мережево-часовій моделі час завершення проєкту  $T_{\text{proj}}$  визначається як максимум по завершеннях робіт мережі, а тривалості робіт включають випадкову суму переробок, аналітичне отримання розподілу  $T_{\text{proj}}$  у загальному випадку є складним. Тому для оцінювання розподілу строків завершення та

пов'язаних показників ризику застосовано імітаційне моделювання методом Монте-Карло.

Імітаційний підхід полягає у багаторазовій генерації реалізацій тривалостей робіт з урахуванням переробок та виконанні мережевого розрахунку СРМ для кожної реалізації. У результаті формується вибірка  $\{T_{\text{proj}}^{(s)}\}_{s=1}^S$ , яка апроксимує розподіл часу завершення проекту. На основі вибірки обчислюються перцентилі (наприклад,  $P50$ ,  $P80$ ,  $P90$ ), ймовірність виконання дедлайну, а також показники критичності робіт і чутливості до параметрів переробок.

## 2. Алгоритм Монте-Карло для стохастичної СРМ/PERT-мережі з переробками.

Нехай кількість ітерацій моделювання дорівнює  $S$ . Для кожної ітерації  $s \in \{1, \dots, S\}$  виконується:

1) Генерація базових тривалостей робіт. Для кожної роботи  $i \in V$  генерується значення  $D_i^{(s)}$  відповідно до PERT-розподілу, параметризованого триточковими оцінками  $(a_i, m_i, b_i)$ .

2) Генерація переробок на контрольних етапах. Для кожного gate  $g \in \{1, \dots, G_i\}$  генерується кількість переробок  $N_{i,g}^{(s)}$  за геометричним законом із параметром  $p_{i,g}$ . Далі генеруються тривалості переробок  $R_{i,g,k}^{(s)}$  (або обчислюється сумарний вклад із урахуванням ефекту навчання  $\alpha_{i,g}$ ). Сумарний вклад переробок по gate формує величину  $W_{i,g}^{(s)}$ , а повна тривалість роботи:

$$T_i^{(s)} = D_i^{(s)} + \sum_{g=1}^{G_i} W_{i,g}^{(s)}.$$

3) Мережевий розрахунок СРМ (прямий прохід). Використовуючи топологічний порядок графа  $G$ , обчислюються ранні моменти старту й завершення для всіх робіт:

$$S_i^{(s)} = \max_{(j,i) \in E} F_j^{(s)}, \quad F_i^{(s)} = S_i^{(s)} + T_i^{(s)}.$$

4) Фіксація часу завершення проекту. Для кожної ітерації:

$$T_{\text{proj}}^{(s)} = \max_{i \in V} F_i^{(s)}.$$

5) Агрегування результатів. Після виконання  $S$  ітерацій отримують вибірку  $\{T_{\text{proj}}^{(s)}\}$ , за якою оцінюються перцентилі, ймовірність дедлайну та інші метрики.

Зазначимо, що збільшення  $S$  підвищує точність оцінок перцентилів і ймовірностей. У практичних експериментах достатньо  $S$  порядку  $10^4 - 2 \cdot 10^4$  для стабільних оцінок  $P50$ ,  $P80$ ,  $P90$  у типових мережах середнього розміру.

## 3. Показники результативності та ризику.

Для аналізу календарних ризиків використовуються такі показники.

1) Перцентильні строки завершення:

$$P_q = \text{Quantile}_q(T_{\text{proj}}), \quad q \in \{0.5, 0.8, 0.9\}.$$

Зокрема,  $P_{80}$  відповідає даті, до якої проєкт завершується з імовірністю 0.8, і є практично релевантним орієнтиром для управлінських зобов'язань.

2) Ймовірність виконання дедлайну  $T^*$ :

$$P_{\text{deadline}} = \mathbb{P}(T_{\text{proj}} \leq T^*),$$

яка оцінюється часткою симуляцій, у яких  $T_{\text{proj}}^{(s)} \leq T^*$ .

3) Критичність робіт (Criticality Index). Через стохастичність тривалостей критичний шлях може змінюватися між ітераціями. Тому для кожної роботи  $i$  обчислюється показник:

$$CI_i = \frac{1}{S} \sum_{s=1}^S 1\{i \in \text{критичною в ітерації } s\}.$$

Високі значення  $CI_i$  ідентифікують “критичне ядро” мережі — роботи, які найчастіше визначають строк завершення.

4) Локальна чутливість (one-at-a-time) та tornado-аналіз. Для ключових параметрів  $\theta \in \{p_{i,g}, \mathbb{E}[R_{i,g}], \alpha_{i,g}\}$  виконується варіювання  $\theta$  на малу відносну величину (наприклад  $\pm 10\%$ ), після чого оцінюється зміна  $P_{80}$ . Це дозволяє ранжувати фактори, що найбільше впливають на ризикові строки.

#### 4. Візуалізація результатів.

Для інтерпретації імітаційних даних застосовано такі графіки.

1) S-крива (емпірична функція розподілу, ECDF) для  $T_{\text{proj}}$  (рисунок 1). Вона дозволяє візуально оцінювати  $P_{50}/P_{80}/P_{90}$  та ймовірність виконання дедлайну як значення ECDF у точці  $T^*$ . S-крива також демонструє ширину “зони невизначеності” – інтервал, у якому крива зростає найшвидше.

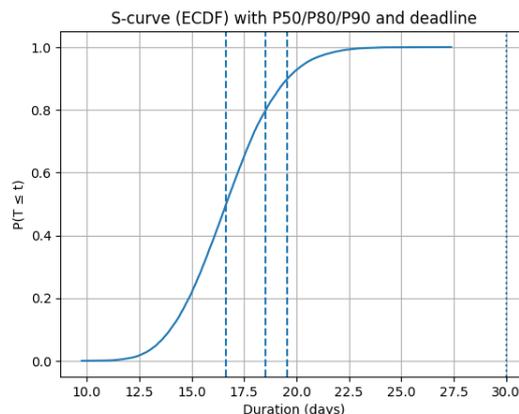


Рисунок 1 – S-крива (емпірична функція розподілу, ECDF) тривалості завершення проєкту  $T_{\text{proj}}$  з позначенням перцентилів  $P_{50}/P_{80}/P_{90}$  та дедлайну  $T^*$

2) Залежність  $P_{\text{deadline}}$  від імовірності переробок  $p$  (рисунок 2). Такий графік показує, наскільки дедлайн є чутливим до зростання частоти відхилень на певному gate

(наприклад review чи QA). Якщо крива наближається до 1 на всьому діапазоні  $p$ , це означає, що дедлайн має надлишковий запас і не є обмежувальним.

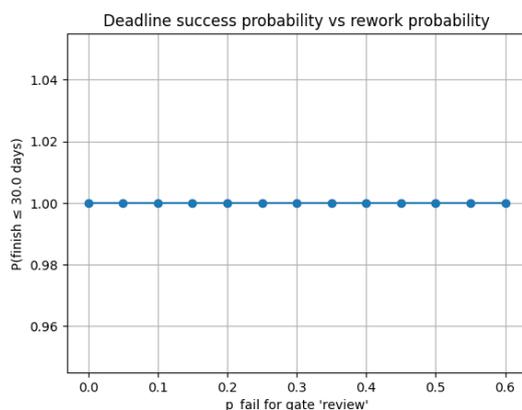


Рисунок 2 – Залежність ймовірності виконання дедлайну  $\mathbb{P}(T_{proj} \leq T^*)$  від імовірності переробки  $p_{i,g}$  на контрольному етапі review (за фіксованого  $T^* = 30$  днів)

3) Залежність  $P80$  від параметра навчання  $\alpha$  (рисунок 3). Монотонне зростання  $P80$  при  $\alpha \rightarrow 1$  підтверджує адекватність моделі: слабший ефект навчання збільшує верхні перцентилі строків.

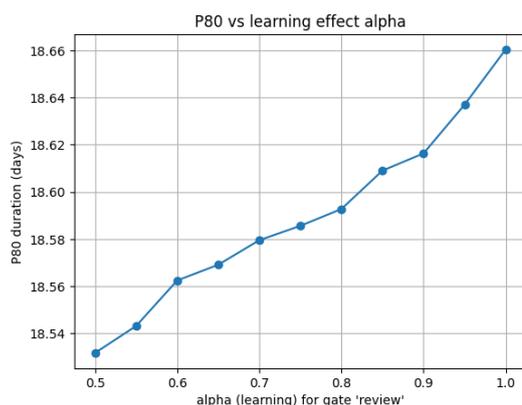


Рисунок 3 – Залежність перцентиля  $P80$  тривалості завершення проекту  $T_{proj}$  від параметра навчання  $\alpha$  для контрольного етапу review

4) Tornado-діаграма чутливості  $P80$  (рисунок 4). Вона дозволяє кількісно порівняти, які параметри (наприклад  $p_{i,g}$  для QA/UAT чи масштаб переробок у review) є основними драйверами зміщення  $P80$ .

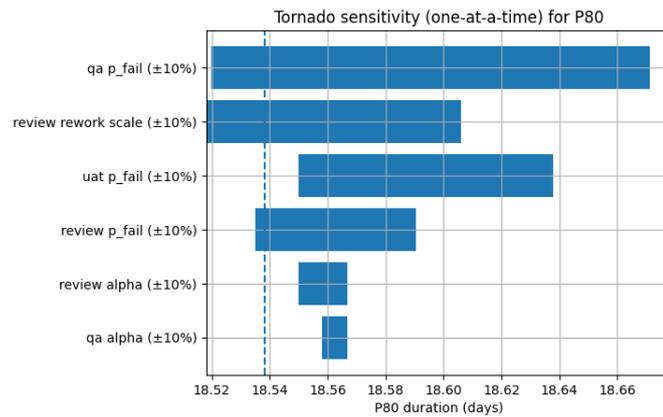


Рисунок 4 – Tornado-діаграма чутливості (one-at-a-time) перцентиля  $P_{80}$  тривалості завершення проекту  $T_{proj}$  до варіації ключових параметрів моделі переробок ( $\pm 10\%$ ); штрихова лінія відповідає базовому значенню  $P_{80}$

5) Criticality Index по роботах (рисунок 5). Стовпчикова діаграма  $CI_i$  показує, які роботи формують стійке критичне ядро, а які лише зрідка стають критичними через випадкові коливання тривалостей.

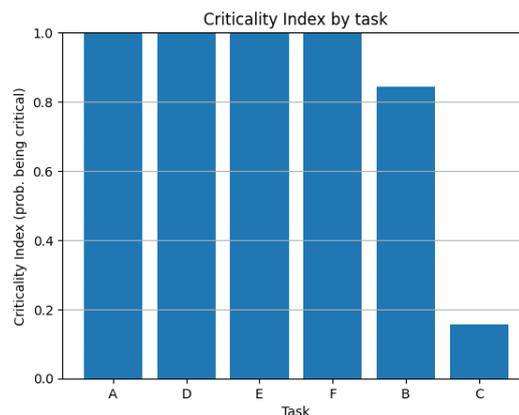


Рисунок 5 – Індекс критичності робіт  $CI_i$  (ймовірність належності роботи ііі до критичного шляху) за результатами Монте-Карло моделювання для мережі проекту

### 3.5. Обговорення результатів.

Отримані результати підтверджують, що явне моделювання механізму переробок після контрольних перевірок істотно впливає на оцінювання строків, особливо у верхніх перцентилях розподілу ( $P_{80}/P_{90}$ ). Саме ці показники є найбільш релевантними для управлінських рішень, оскільки характеризують “надійні” строки завершення за наявності ризиків.

Аналіз S-кривих демонструє, що включення переробок зсуває розподіл  $T_{proj}$  вправо та розширює інтервал невизначеності, що безпосередньо підвищує ризик порушення жорстких дедлайнів. Водночас залежність  $P_{deadline}$  від  $p$  може мати ділянки насичення: якщо дедлайн суттєво перевищує типові значення  $P_{50}/P_{80}/P_{90}$ , то ймовірність виконання дедлайну стає близькою до 1 і втрачає чутливість до параметрів переробок. У та-

кому випадку більш інформативними є графіки перцентилів, а також tornado-аналіз, який виявляє відносний внесок різних gate у ризикові строки.

Результати критичності підтверджують, що в стохастичній мережі критичний шлях є змінною величиною: одні роботи залишаються критичними майже завжди, тоді як інші стають критичними лише за певних сценаріїв (наприклад через додаткові переробки на окремих етапах приймання). Це дає підстави для практичних висновків щодо пріоритизації управлінських дій: зниження ймовірностей провалу на найбільш впливових gate та скорочення тривалостей переробок у “критичному ядрі” мережі забезпечують найбільший ефект у зменшенні  $P50 / P80 / P90$ .

У підсумку, імітаційне моделювання в межах запропонованої математичної моделі забезпечує перехід від детермінованих оцінок строків до ймовірнісного опису, що є більш адекватним для реальних ІТ-проектів з багатоетапним контролем якості та повторними переробками. Отримані показники можуть використовуватися для формування буферів, прийняття зобов’язань за контрактними строками, а також для вибору пріоритетних заходів з управління ризиками.

**Висновки.** У роботі сформовано мережево-часову постановку на основі СРМ/PERT для оцінювання строків завершення ІТ-проектів за умов невизначеності, з переходом від “точкових” оцінок до імовірнісних характеристик.

Запропоновано врахування ризиків затримок через керування параметрами задач критичного шляху (зменшення тривалості та дисперсії), що дозволяє формалізувати задачу зниження ризику зриву дедлайну. Реалізовано обчислювальний експеримент (умовний ІТ-проект із 9 задачами) з визначенням критичного шляху та оцінкою ймовірності завершення при заданому дедлайні; показано практичну ефективність підходу. Оптимізаційний вплив на параметри задач забезпечив зростання ймовірності завершення проекту у строк з 15.78% до 43.34%, що демонструє чутливість календарного ризику до навіть помірних змін параметрів мережі. У частині імітаційного аналізу обґрунтовано використання показників ризику та інтерпретаційних візуалізацій: ймовірність виконання дедлайну, індекс критичності робіт (criticality index) і tornado-аналіз чутливості, а також S-криву (ECDF) для перцентильних строків.

Отримані результати підтверджують доцільність поєднання PERT із математичним моделюванням для підвищення надійності планування строків ІТ-проектів і зниження ризику затримок.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Chen, L., Lu, Q., & Han, D. (2023). A Bayesian-driven Monte Carlo approach for managing construction schedule risks of infrastructures under uncertainty. *Expert Systems with Applications*, 212, 118810. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.118810>
2. Fitzsimmons, J. P. (2022). Construction schedule risk analysis. *Electronic Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 27(5), 100–118. <https://doi.org/10.36680/j.itcon.2022.005>

3. Ichsán, M., Nugraha, D., & Lee, S. (2025). Monte Carlo simulation for enhancing the schedule completion forecast in construction projects. *Applied Sciences*, 15(2), 935–950. <https://doi.org/10.3390/app15020935>
4. Maier, J. F., Eckert, C. M., & Clarkson, P. J. (2017). Simulating progressive iteration, rework and change propagation in complex design processes. *Research in Engineering Design*, 28(1), 25–50. <https://doi.org/10.1007/s00163-016-0232-1>
5. Nelson, R. G., Azaron, A., & Aref, S. (2016). The use of a GERT based method to model concurrent product development processes. *European Journal of Operational Research*, 249(3), 879–890. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.08.041>
6. Pregina, K., & Kannan, M. R. (2025). A graphical evaluation and review technique for scheduling construction projects. *Journal of Scheduling*, 28(3), 311–328. <https://doi.org/10.1007/s10951-024-00893-0>
7. Sadri, S., & Fatemi Ghomi, S. M. T. (2024). Evaluating time–cost trade-off in a resource constraint GERT-type project scheduling problem considering rework. *International Journal of Systems Science: Operations & Logistics*. <https://doi.org/10.1080/23302674.2024.2394115>
8. Saiz, M., Juan, A. A., & Martí, R. (2024). A simheuristic for project portfolio optimization combining Monte Carlo simulation and critical path analysis. *Computers & Operations Research*, 159, 106234. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2024.106234>
9. Senses, S. (2024). Trade-off between time and cost in project planning under uncertainty using Monte Carlo simulation. *Simulation*, 100(4), 289–303. <https://doi.org/10.1177/00375497241234567>
10. Tao, L., Wu, D., Liu, S., & Lambert, J. H. (2017). Schedule risk analysis for new-product development: The GERT method extended by a characteristic function. *Reliability Engineering & System Safety*, 167, 464–473. <https://doi.org/10.1016/j.res.2017.06.009>

Received 03.11.2025.  
Accepted 27.11.2025.

### ***Stochastic network–time PERT/CPM model with probabilistic rework for forecasting IT project completion times***

*Information technology (IT) projects are often affected by two sources of uncertainty. First, the duration of each activity is not known in advance and can vary widely due to technical complexity, changing requirements, and team-related factors. Second, many deliverables must pass through multiple verification and acceptance gates—such as code review, quality assurance (QA) testing, security checks, and user acceptance testing (UAT). At these gates, outcomes may fail to meet agreed criteria and therefore require rework. This iterative “do–check–rework” cycle is a common reason why projects deviate from deterministic schedules. Traditional CPM schedules and many classical PERT applications typically treat activities as one-pass tasks and do not explicitly represent repeated rework loops. As a result, they can underestimate completion-time risk, especially in the upper tail of the distribution, and provide overly optimistic target dates.*

*This paper presents a stochastic network–time scheduling model that integrates the PERT/CPM framework with an explicit probabilistic representation of rework. The project is modeled as a precedence network where nodes represent activities and directed links represent finish-to-start constraints. Each activity has a base duration described by a three-point*

*estimate (optimistic, most likely, and pessimistic) and is treated as a random variable following a PERT-type distribution. To represent rework, each activity may be associated with one or more verification gates. For each gate, the model specifies a probability that the activity fails the gate and must be reworked, and a probability distribution for the rework effort (also described using three-point estimates). The number of rework cycles is modeled as a random count driven by repeated attempts until the gate is passed. Optionally, the model includes a learning effect: repeated rework cycles may become faster over time as the team gains understanding, defects become localized, and corrective actions become more targeted.*

*To obtain project completion-time forecasts, the study uses Monte Carlo simulation. In each simulation run, base durations and rework outcomes are sampled for all activities and gates, and then a standard CPM forward pass computes start and finish times consistent with network dependencies. Repeating this process many times produces an empirical distribution of total project duration. From this distribution, the paper reports percentile completion dates (such as median, 80th percentile, and 90th percentile) and the probability of meeting a specified deadline. Percentile-based dates are emphasized because they are more suitable for reliable commitments than mean-based estimates in the presence of rework-driven tail risk.*

*In addition to overall completion-time forecasts, the paper provides diagnostic analyses to support risk management. First, an S-curve (empirical cumulative distribution) visualizes the completion-time distribution and allows direct reading of deadline probabilities and percentile dates. Second, parameter sweeps demonstrate how deadline success probability changes when rework probability increases at a specific gate and how upper-percentile completion times respond to changes in the learning effect. Third, a tornado-style one-at-a-time sensitivity analysis ranks which rework-related parameters have the greatest impact on a risk-oriented completion metric (e.g., the 80th percentile). Finally, the paper computes a Criticality Index for each activity—the fraction of simulation runs in which the activity lies on the critical path—showing that criticality can shift between branches under uncertainty and highlighting a “critical core” of activities that most frequently drive the project finish date.*

*The results indicate that explicitly modeling probabilistic rework materially affects forecasted completion dates and expands the uncertainty range, particularly in the upper tail. The approach supports more realistic buffer sizing and deadline-risk assessment than deterministic planning. Sensitivity and criticality outputs provide actionable guidance by identifying which gates (e.g., QA or UAT) and which activities should be prioritized for quality improvements, automation, clearer acceptance criteria, or process changes that reduce the frequency and cost of rework.*

*Overall, the proposed stochastic PERT/CPM model with probabilistic rework offers a practical and mathematically grounded method for forecasting completion dates and quantifying deadline risk in IT projects with multi-stage verification and iterative rework. Future research may extend the model to incorporate resource constraints, correlations between activities and risks, and data-driven estimation of model parameters from project repositories and quality metrics.*

*Keywords: project scheduling; PERT; CPM; Monte Carlo simulation; schedule risk analysis; probabilistic rework; verification gates; learning effect; completion forecasting; critical path variability.*

**Селівьорстова Тетяна Віталіївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій і систем, Український державний університет науки і технологій, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2470-6986>.

**Зеленцов Дмитро Гегемонович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Інформаційних систем, Український державний університет науки і технологій, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5785-9858>.

**Романько Ярослав Вікторович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології, теплотехніки та охорони праці, Український державний університет науки і технологій, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6333-6888>.

**Тесленко Іван Романович** – студент, Український державний університет науки і технологій, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0234-868X>.

**Selivorstova Tatyana** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technologies, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2470-6986>.

**Zelentsov Dmytro** – doctor of technical sciences, professor, head of the department of information systems, Ukrainian State University of Science and Technology, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5785-9858>

**Romanko Yaroslav** – candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the department of ecology, thermal engineering and occupational safety, Ukrainian State University of Science and Technology, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6333-6888>.

**Teslenko Ivan** – student, Ukrainian State University of Science and Technology, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0234-868X>.

**ЗМІСТ**

**CONTENTS**

<b>Герасіна О.В.</b> Нейро-нечітке прогнозування самоподібного трафіку інформаційно-комунікаційних мереж для систем виявлення атак	3	<b>Gerasina O.</b> Neural-fuzzy prediction of self-similar traffic of information and communication networks for attack detection systems cylinders	3
<b>Цивінда Н.І., Пікільняк А.В., Зуєв І.О.</b> Аналіз основних напрямків підвищення експлуатаційної надійності гідроциліндрів	18	<b>Tsyvinda N.I., Pikilniak A.V., Zuev I.O.</b> Analysis of the main directions for improving the operational reliability of hydraulic cylinder	18
<b>Сідлецький С.В., Демчишин А.А., Каленюк О.С., Донець А.Г.</b> Комплекс людино-машинної взаємодії на основі кібер-рукавички з реєстрацією згину пальців	29	<b>Sidletskyi S.V., Demchyshyn A.A., Kaleniuk O.S., Donets A.G.</b> Cyber-glove-based human-computer interaction system with finger flexion sensing	29
<b>Ярова О.А.</b> Асимптотика випадкової еволюції на регенеруючому процесі	37	<b>Yarova O.A.</b> Asymptotics of random evolution on a renewal process	37
<b>Колосовський А.І.</b> Системний підхід до автоматизації випікання хліба на основі параметризації об'єкта керування	45	<b>Kolosovskyi A.I.</b> A systemic approach to bread baking automation based on control object parameterization	45
<b>Гвоздева І.М., Миргород В.Ф., Жеков Б.В., Єрмошкін О.М., Грама Г.П.</b> Дослідження характеристик датчика TRO при експлуатації системи очищення баластних вод	58	<b>Hvozdeva I., Myrhorod V., Zhekov B., Yermoshkin O., Grama G.</b> Study of TRO sensor characteristics during operation of ballast water treatment system	58
<b>Кувівчак В.Р., Вельгош С.Р.</b> Методи виділення колірних ознак зображення	71	<b>Kuhivchak V., Velhosh S.</b> Image color feature extraction methods review	71

<b>Бердник М.Г., Стародубський І.П.</b> Механізми самопрофілювання компіляторів для коду в реальному часі	85	<b>Berdnyk M., Starodubskiy I.</b> Self-profiling mechanisms for real-time code compilers	85
<b>Віжуткін І.Д., Ліхоузова Т.А.</b> Прогнозування активності користувачів у відеоіграх	96	<b>Vizhutkin I.D., Likhouzova T.A.</b> Predicting user activity in video games	96
<b>Морозов Ю.С., Зайцева Т.А.</b> Застосуванням глибокого навчання для підвищення ефективності розв'язання задач контактної механіки методом скінченних елементів	103	<b>Morozov Y., Zaytseva T.</b> Application of deep learning for improving the efficiency of solving contact mechanics problems by the finite element method	103
<b>Козлюк І.О., Прокопович-Ткаченко Д.І.</b> Просторове моделювання ризиків витоку інформації в офісних мережах: побудова контрольованої зони	114	<b>Kozliuk I.O., Prokopovych-Tkachenko D.I.</b> Spatial modeling of information leakage risks in office networks: construction of a controlled zone	114
<b>Жадан А.А., Шинкаренко В.І.</b> Використання методів конструктивно-продукційного моделювання для прогнозування детермінованих часових рядів	129	<b>Zhadan A.A., Shynkarenko V.I.</b> Application of constructive-production modeling methods for forecasting deterministic time series	129
<b>Маліч М.Г., Щербаков Г.Л., Лайков Д.В., Герасимчук В.О.</b> Інтелектуальна інформаційно-вимірювальна система параметрів технологічного процесу комбінованих енергосистем	143	<b>Malich M.H., Shcherbakov H.L., Laikov D.V., Herasymchuk V.O.</b> Intellectual information and measurement system of parameters of the technological process of combined power systems	143
<b>Кавац О.О.</b> Інформаційні технології супутникового моніторингу сталого розвитку	149	<b>Kavats O.O.</b> Information technologies for satellite monitoring of sustainable development	149

<b>Божуха Д., Байбуз О.</b> Модель спільного динамічного розвантаження хмарної архітектури з балансуванням рівнів	157	<b>Bozhukha D., Baibuz O.</b> A model of joint dynamic offloading of cloud architecture with load balancing of layers	157
<b>Гнатушенко В., Гришак Д., Олевська Ю., Олевський В., Удовик І.</b> Методологія об'єднання даних багатоканальних зображень	163	<b>Hnatushenko V., Hryshchak D., Olevska Yu., Olevsky V., Udovyk I.</b> Methodology for data fusion of multichannel images	163
<b>Метелиця А.О.</b> Керування стабілізацією напруги постійного струму в джерелах альтернативної енергетики	177	<b>Metelitsa A.O.</b> Control of DC voltage stabilization in alternative energy sources	177
<b>Ларіонов Г.І., Волошко В.Л.</b> Використання методу послідовної апроксимації до стиснення зображень	191	<b>Larionov H.I., Voloshko V.L.</b> Application of the method of successive approximation for image compression	191
<b>Мітіков М.Ю., Гук Н.А.</b> Архітектура експертної системи для аналізу знімків пам'яті	199	<b>Mitikov N., Huk N.</b> Architecture of an expert system for analysing memory snapshots	199
<b>Селівьорстова Т.В., Зеленцов Д.Г., Романько Я.В., Тесленко І.Р.</b> Стохастична мережево-часова модель PERT/CPM з імовірнісними переробками для оцінювання строків ІТ-проекті	212	<b>Selivorstova T., Zelentsov D., Romanko Y., Teslenko I.</b> Stochastic network–time PERT/CPM model with probabilistic rework for forecasting IT project completion times	212

РЕФЕРАТИ

УДК 004.056: 004.94

Герасіна О.В. **Нейро-нечітке прогнозування самоподібного трафіку інформаційно-комунікаційних мереж для систем виявлення атак** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.3 – 17.

Запропоновано для прогнозування самоподібного трафіку інформаційно-комунікаційних мереж використовувати адаптивні фільтри-апроксиматори у вигляді адаптивних систем нечіткого висновку на основі алгоритмів Сугено-Такагі, Такагі-Сугено-Канга та Ванга-Менделя. Шляхом моделювання на основі експериментальних даних показана ефективність розв’язання задачі прогнозування мережевого трафіка із використанням глобальних методів оптимізації та нейро-нечітких фільтрів. Підтверджена адекватність отриманих результатів.

Бібл. 17, іл. 5.

УДК 621.623.3:621.01

Цивінда Н.І., Пікільняк А.В., Зуєв І.О. **Аналіз основних напрямків підвищення експлуатаційної надійності гідроциліндрів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.18 – 28.

Розглянуто чинники, що впливають на надійність гідроциліндрів, як ключових вузлів гідросистем гірничого обладнання. Проаналізовано причини відмов, оцінено показники конструкційної та технологічної якості. Запропоновано напрями удосконалення ущільнень, конструкції корпусу та підвищення рівня уніфікації.

Бібл. 10, Іл. 2.

УДК 004.358

Сідлецький С.В., Демчишин А.А., Каленюк О.С., Донець А.Г. **Комплекс людино-машинної взаємодії на основі кібер-рукавички з реєстрацією згину пальців** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.29 – 36.

У роботі представлено апаратно-програмний комплекс людино-машинної взаємодії у вигляді кібер-рукавички. Комплекс включає маніпулятор, розроблений на основі носимої плати мікроконтролера, оснащеної датчиками орієнтації та згину пальців, прошивку мікроконтролера, серверний застосунок для зчитування та обробки даних з використанням фільтра Маджвіка, а також клієнтський застосунок для візуалізації виконання команд. Використання фільтра для обробки даних датчиків забезпечує стабільне визначення просторової орієнтації маніпулятора, а ступінь згину пальців — подачу команд на основі жестів. Запропонована архітектура та інтерфейс програмування застосунків дозволяють використовувати маніпулятор для задач дистанційного керування.

Бібл. 13, іл. 4.

УДК 519.2

Ярова О.А. **Асимптотика випадкової еволюції на регенеруючому процесі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.37 – 44.

Стаття присвячена асимптотичному аналізу випадкових еволюцій, які побудовані на основі регенеруючого процесу. У роботі досліджується клас стохастичних процесів з нелінійним нормуванням часу, що виникають у моделях, де наявна структурна регенерація або ефекти пам'яті. У статті доведено граничну теорему, яка встановлює асимптотичну поведінку середніх значень випадкової еволюції при зростанні часу до нескінченності при нелінійному нормуванні.

Бібл. 6, іл. 0, табл. 0.

УДК 664.665.041.12/13.021 (043.3)

Колосовський А.І. **Системний підхід до автоматизації випікання хліба на основі параметризації об'єкта керування** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.45 – 57.

У статті обґрунтовано необхідність створення дворівневої системи автоматичного керування процесом випікання хліба з урахуванням динамічних змін середовища та параметрів тіста. Проведено параметризацію режимів у зоні зволоження, проаналізовано вплив технологічних факторів на якість продукції та енергоефективність. Представлено схеми, що описують об'єкт керування – піч Г4-ПХЗС-25.

Бібл. 18, іл. 3, табл. 2.

УДК 656.61.052

Гвоздева І.М., Миргород В.Ф., Жеков Б.В., Єрмошкін О.М., Грама Г.П. **Дослідження характеристик датчика ТРО при експлуатації системи очищення баластних вод** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.58 – 70.

Здійснений порівняльний аналіз методів і технологій, які застосовуються для очищення баластних вод на борту суден. Проведено експериментальні дослідження характеристик датчиків ТРО (загального залишкового окислювача) під час роботи суднової системи очищення баластних вод Electro-Cleen™ System в усіх режимах її експлуатації (баластування, дебаластування та стріпінгу). Запропонована нова структура системи автоматичного управління, яка містить додатковий контур автоматичного корегування значень датчика ТРО. Розроблено програмне забезпечення додаткового програмованого логічного контролера.

Бібл. 15, іл. 5, табл. 1.

УДК 004.932

Кувівчак В.Р., Вельгош С.Р. **Методи виділення колірних ознак зображення** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.71 – 84.

Метою роботи є комплексний огляд наукових публікацій та результатів досліджень інших авторів щодо методів виділення колірних ознак зображень з системати-

зацією підходів та узагальненням отриманих результатів. У дослідженні на основі аналізу наукових праць розглянуто дванадцять основних методів: гістограма кольору (глобальні та локальні), перетин гістограм, гістограма кольору для К-середніх, корелограма кольору, матриці взаємо-появи кольорів, дескриптори домінуючих кольорів, дескриптори розташування кольорів, моменти кольору, вектор когерентності кольору, моменти хроматичного розподілу Зерніке та кватерніонні моменти Зерніке.

Бібл. 20, іл. 2.

УДК 004.89

Бердник М.Г., Стародубський І.П. **Механізми самопрофілювання компіляторів для коду в реальному часі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.85 – 95.

У статті досліджується концепція самопрофілювальних компіляторів як засобу адаптивної оптимізації коду в реальному часі. Підхід ґрунтується на збиранні динамічних метрик продуктивності під час виконання програми та аналізі отриманих даних для вибору найефективніших стратегій компіляції. Запропоновано архітектуру компілятора, здатного автоматично виявляти критичні з точки зору продуктивності ділянки коду (hotspots), налаштовувати конфігурацію оптимізаційних проходів і здійснювати повторну компіляцію з урахуванням оновлених метрик.

Бібл. 10.

УДК 004.91

Віжукткін І.Д., Ліхоузова Т.А. **Прогнозування активності користувачів у відеоіграх** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.96 – 102.

Розглянуто прогнозування активності користувачів у відеоіграх, яке нині є надзвичайно актуальним завданням і має важливе значення для розробників, видавців та аналітиків ігрової індустрії. Точне прогнозування кількості онлайн-гравців дозволяє приймати стратегічні рішення щодо оновлень, маркетингових кампаній та розвитку проєктів, а також оптимізувати серверні потужності й ресурси. У рамках даної роботи проведено аналіз історичних та поточних даних про онлайн активність у іграх платформи Steam. Для розв'язання задачі прогнозування були застосовані методи машинного навчання Gradient Boosting, LinearSVR, а також моделі часових рядів (S)ARIMA(X). Результат роботи може бути використаний для прогнозування кількості онлайн-гравців у грі через місяць на основі історичних та поточних параметрів.

Бібл. 8, іл. 4, табл. 1.

УДК 539.374:004.89:004.942

Морозов Ю.С., Зайцева Т.А. **Застосуванням глибокого навчання для підвищення ефективності розв'язання задач контактної механіки методом скінченних елементів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.103 – 113.

У роботі розглянуто інтеграцію методу скінченних елементів (МСЕ) з методами глибокого навчання для розв'язання задач контактної механіки. Класичний МСЕ забезпечує прийнятну точність, але вимагає значних обчислювальних ресурсів при моделю-

ванні складних систем та процесів. Запропонований підхід передбачає використання результатів МСЕ на спрощеній сітці з подальшим уточненням напружень за допомогою нейронної мережі прямого поширення. Продемонстровано, що такий підхід дозволяє досягти точності, близької до результатів на дрібній сітці, при значно меншій обчислювальній складності, що відкриває нові можливості для інженерних застосувань.

Бібл. 12, іл. 2, табл. 1.

УДК 004.056.5+004.056.55

Козлюк І.О., Прокопович-Ткаченко Д.І. **Просторове моделювання ризиків витоку інформації в офісних мережах: побудова контрольованої зони** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.114 – 128.

Розглядається проблема виникнення технічних каналів витоку інформації в офісних мережах, зумовлена електромагнітними випромінюваннями бездротових засобів. Запропоновано просторово-математичну модель, що базується на модифікованій моделі Хата з урахуванням коефіцієнтів поглинання будівельних матеріалів і експоненційного закону загасання. Сформовано методику побудови карти уразливості на основі бінарної матриці покриття та оптимізації розміщення датчиків витоку інформації за критерієм максимального перекриття з урахуванням бюджетних обмежень. У дослідному кейсі встановлено, що для частоти 96,1 МГц і потужності 2,3 мВт межа згасання сигналу формується на відстанях понад 10 м, а рекомендована контрольована зона становить близько 24×8,5 м. Запропонована модель забезпечує кількісну оцінку ризиків радіовитоку та може бути інтегрована в системи управління інформаційною безпекою відповідно до стандартів ISO/IEC 27005 і національних нормативів ТЗІ. Показано практичну значущість методики для державних органів, бізнес-центрів та об'єктів критичної інфраструктури.

Бібл. 30, рис. 1, табл. 2.

УДК 004.942

Жадан А.А., Шинкаренко В.І. **Використання методів конструктивно-продукційного моделювання для прогнозування детермінованих часових рядів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.129 – 142.

У роботі досліджується застосування конструктивно-продукційного підходу для синтетичних детермінованих фрактальних рядів з метою відновлення їх конструктивної моделі, на основі якої виконується прогнозування подальших значень ряду. Метод порівнювався з ARIMA, LSTM, ARIMA-LSTM та CNN-LSTM, а точність оцінювалася за метриками MAE та MAPE. Результати показали, що конструктивно-продукційне моделювання забезпечує найвищу точність серед усіх протестованих моделей і дозволяє досліджувати внутрішню структуру та закономірності часового ряду.

Бібл. 27, іл. 2, табл. 3.

УДК 631.354.2

Маліч М.Г., Щербаков Г.Л., Лайков Д.В., Герасимчук В.О. **Інтелектуальна інформаційно-вимірювальна система параметрів технологічного процесу комбінованих енергосистем** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.143 – 148.

Розглядається розробка інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи параметрів технологічного процесу комбінованих енергосистем, яка побудована за концепцією розподіленої енергогенерації. Актуальність розробки пов'язана з підвищенням живучості та надійності енергосистем в умовах техногенних катастроф та військових конфліктів. Метою статті є обґрунтування нової структури та особливостей функціонування інтелектуальної інформаційно-вимірювальної системи з урахуванням параметрів технологічного процесу комбінованих енергосистем. Інтелектуальна інформаційно-вимірювальна система побудована з використанням математичних методів аналізу технологічних процесів на принципах сучасної елементної бази та комп'ютерних технологій. Застосування такої системи дозволяє реалізувати моніторинг протікання технологічного процесу функціонування комбінованої енергосистеми, підвищити надійність функціонування технологічного обладнання та суттєво підвищити ефективність роботи.

Бібл. 8, іл. 3.

УДК 004.9:551.583:502

Кавац О.О. **Інформаційні технології супутникового моніторингу сталого розвитку** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.149 – 156.

У статті досліджено сучасні інформаційні технології супутникового моніторингу та їх застосування для забезпечення сталого розвитку в Україні. Розглянуто концепцію сталого розвитку як основу формування ефективної соціально-економічної та екологічної політики, що передбачає гармонізацію економічного зростання, раціонального природокористування та збереження довкілля. Особлива увага приділена проблемам відновлення природних комплексів та ефективного управління земельними, водними й лісовими ресурсами, що загострилися внаслідок інтенсивного антропогенного навантаження та наслідків повномасштабної війни.

Проаналізовано європейський досвід інтеграції супутникових платформ Copernicus, EO4SD/AgriSense та GoldenRAM, який демонструє високу ефективність комплексного моніторингу природних, аграрних та промислових процесів із використанням алгоритмів обробки великих даних, штучного інтелекту та геопросторової аналітики. Показано, що інтеграція супутникових даних із сучасними ІТ-інфраструктурами дозволяє здійснювати оперативний контроль стану екосистем, прогнозування врожайності, управління водними ресурсами та оцінку екологічних ризиків видобутку корисних копалин.

У статті визначено ключові проблеми української системи моніторингу: недостатню розвиненість національної обчислювальної інфраструктури, відсутність стандартів інтеграції різномірних джерел даних та дефіцит кваліфікованих фахівців. Ро-

зроблено концептуальні підходи та методологію використання супутникових даних для комплексної оцінки стану екологічних та соціально-економічних систем в Україні.

Обґрунтовано, що впровадження таких технологій сприятиме підвищенню ефективності державної політики сталого розвитку, прозорості управлінських рішень, відновленню та реконструкції територій після війни, забезпеченню екологічної безпеки та продовольчої стабільності на національному рівні.

Ключові слова: супутниковий моніторинг, дистанційне зондування, інформаційні технології, цілі сталого розвитку, Copernicus, EO4SD, GoldenRAM, природні ресурси.

Бібл.11, Рис. 2.

УДК 004.042, 004.02, 004.67

Божуха Д., Байбуз О. **Модель спільного динамічного розвантаження хмарної архітектури з балансуванням рівнів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.157 – 162.

У роботі розглядається можливість створення гібридної системи, яка у своєму складі має типову систему граничних, туманних та хмарних обчислень для дослідження питання оптимізації навантаження за рахунок перерозподілу частини завдань між пристроями на рівнях. Наведено опис моделі, яка поєднує принципи проектування граничних, туманних та хмарних обчислень. Для перевірки опису побудованої моделі використано модель з обмеженою кількістю пристроїв у своєму складі. Проведено аналіз отриманих даних про зв'язок між стратегією та функцією траєкторії навантаження хмарної системи.

Бібл. 3, іл. 0, табл. 0.

УДК 624.04

Гнатушенко В., Гришак Д., Олевська Ю., Олевський В., Удовик І. **Методологія об'єднання даних багатоканальних зображень** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.163 – 176.

Запропонована методологія об'єднання багатоканальних зображень для покращення точності аналізу, підвищення інформативності та зниження впливу шумів. Методологія базується на використанні математичних моделей для гармонізації різнорідних даних, включаючи алгоритми попереднього препроцесингу, спектрального аналізу та машинного навчання. Розглянуто адаптацію підходів для специфічних завдань: об'єднання даних дистанційного зондування Землі для картографічного аналізу та злиття зображень різної модальності. Проведені експерименти демонструють підвищення якості результатів при використанні запропонованого підходу.

Бібл. 16, іл. 3.

УДК 621.314.26

Метелиця А.О. **Керування стабілізацією напруги постійного струму в джерелах альтернативної енергетики** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.177 – 190.

У роботі спроектовано цифровий контур керування стабілізації напруги постійного струму, проаналізовано конструктивні особливості та технічні параметри лінійних

та імпульсних послідовних перетворювачів напруги постійного струму. Представлено структурні та функціональні схеми.

Основою дослідження є побудова структурної та функціональних схем цифрового контуру керування стабілізації напруги постійного струму на основі 4-бітного, 8-бітного цифро аналогового перетворювача зі струмовим керуванням. Аналіз результатів імітаційного моделювання впливу пульсації напруги живлення на вихідну напругу цифрового контуру показав очікувані результати, зокрема плавний запуск при регулюванні та низький рівень пульсацій без використання додаткових фільтрів. В схемо технічних рішеннях присутній зворотній зв'язок контролю вихідної напруги, що усунуло температурний і часовий дрейф параметрів.

Бібл. 14, іл. 10.

УДК 622.28.044:622.831

Ларіонов Г.І., Волошко В.Л. **Використання методу послідовної апроксимації до стиснення зображень** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.191 – 198.

Розглядається задача про передачу великого об'єму інформації, що потребує значної потужності і ємності джерел живлення, які є обмеженими. Експлуатація широкого спектру машин і механізмів показала, що основним обмеженням на терміни їх функціонування є ємності джерел живлення. Все це змушує скорочувати час роботи передавача та основного режиму витрат енергії. Таким чином, задача збільшення термінів функціонування пов'язана зі скороченням часу передачі даних. А це можливо за рахунок зменшення їх об'єму, тобто стиснення. Запропоновано методику розрахунку характеристик процесу стиснення. Проаналізовано вплив геометричних і фізичних параметрів на ці процеси.

Бібл. 5, іл. 7.

УДК 519.6:004.4:004.942

Мітіков М.Ю., Гук Н.А. **Архітектура експертної системи для аналізу знімків пам'яті** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.199 – 211.

Запропоновано архітектуру експертної системи на основі правил, що призначена для аналізу знімків пам'яті програмних додатків з метою виявлення і усунення неефективного використання пам'яті. Система використовує продукційні правила, що ґрунтуються на знаннях про типи об'єктів та їхні властивості (зокрема, незмінність), статистику алокацій та розподіл об'єктів у пам'яті. Розроблено формальну модель представлення знімку пам'яті як сукупності об'єктів з певними атрибутами, введено критерії виявлення дублікатів незмінної інформації та надлишкового резервування пам'яті. Описано механізми групування об'єктів за типами і значеннями для діагностики дублювання даних, а також методи визначення неефективних алокацій, зокрема, надмірного розміру структур даних відносно їх корисного вмісту). Система генерує рекомендації у вигляді інструкцій щодо оптимізації коду, а саме впровадження кешування або пулів об'єктів, перерозподіл структури даних тощо. В системі здійснюється

оцінювання очікуваного виграшу в пам'яті. Наведено математичні формалізації для опису вхідних даних, операцій групування, фільтрації та порівняння об'єктів.

Бібл. 12.

УДК 519.876.5+004.4'272+005.8

Селівьорстова Т.В., Зеленцов Д.Г., Романько Я.В., Тесленко І.Р. **Стохастична мережево-часова модель PERT/CPM з імовірнісними переробками для оцінювання строків ІТ-проекти** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 6(161). – Дніпро, 2025. – С.212 – 227.

У статті розглянуто задачу імовірнісного оцінювання строків завершення ІТ-проектів за умов невизначеності тривалостей робіт і повторних циклів доопрацювання результатів після контрольних перевірок (rework). Запропоновано стохастичну мережево-часову модель на основі PERT/CPM, у якій базові тривалості робіт задаються триточковими оцінками PERT, а механізм переробок формалізовано через ймовірність непроходження контрольного етапу та випадкову тривалість переробки (з можливістю врахування ефекту навчання). Для отримання розподілу часу завершення проекту застосовано імітаційне моделювання методом Монте-Карло з мережевим розрахунком ранніх термінів старту/завершення. Обчислюються перцентильні строки завершення (P50/P80/P90), ймовірність виконання заданого дедлайну та показники критичності робіт і чутливості параметрів (tornado-аналіз). Запропонований підхід забезпечує більш адекватне оцінювання календарних ризиків порівняно з детермінованими планами та може бути використаний для обґрунтування буферів і пріоритетів управління якістю й ризиками в ІТ-проектах.

Бібл. 10.

UDK 004.056: 004.94

Gerasina O. **Neural-fuzzy prediction of self-similar traffic of information and communication networks for attack detection systems cylinders** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.3 – 17.

It was established that the current task is to build adequate predictive models of network self-similar traffic, which would allow their use in IDS for detecting network anomalies in real time with sufficient efficiency in terms of errors and reliability and increased efficiency. It is proposed to use adaptive filter-approximators in the form of adaptive fuzzy inference systems based on the Sugeno-Takagi, Takagi-Sugeno-Kang and Wang-Mendel algorithms for predicting self-similar traffic of information and communication networks.

Bibl. 17, ill. 5.

UDC 621.623.3:621.01

Tsyvinda N.I., Pikilniak A.V., Zhev I.O. **Analysis of the main directions for improving the operational reliability of hydraulic cylinders** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.18 – 28.

The paper examines the factors affecting the reliability of hydraulic cylinders as key components in mining machinery hydraulics. It analyzes failure causes, assesses technological and design quality indicators, and suggests improvements in seals, housing design, and standardization approaches.

Ref. 10, Fig. 2.

UDC 004.358

Sidletskyi S.V., Demchyshyn A.A., Kaleniuk O.S., Donets A.G. **Cyber-glove-based human-computer interaction system with finger flexion sensing** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.29 – 36.

The work presents a hardware-software system for human-computer interaction in the form of a cyber-glove. The system includes a manipulator developed using a wearable microcontroller board equipped with orientation and finger bending sensors, microcontroller firmware, a server application that reads and processes data using the Madgwick filter, and a client application that visualizes command execution. The use of the filter for processing sensor data enables stable determination of the manipulator's spatial orientation, while finger bending degree provides gesture-based commands. The proposed architecture and application programming interface allow the manipulator to be used for remote control tasks.

Ref. 13, il. 4.

UDC 519.2

Yarova O.A. **Asymptotics of random evolution on a renewal process** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.37 – 44.

The article is devoted to the asymptotic analysis of random evolutions, which are built on the basis of a regenerating process. The paper investigates the class of stochastic processes with nonlinear time normalization, which arise in models where there is structural regeneration or memory effects. The article proves a limit theorem that establishes the asymptotic behavior of the average values of random evolution as time increases to infinity with nonlinear normalization.

Bibl. 6, ill. 0, tab. 0.

UDC 664.665.041.12/13.021 (043.3)

Kolosovskiy A.I. **A systemic approach to bread baking automation based on control object parameterization** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.45 – 57.

The article substantiates the need for a two-level automatic control system for the bread baking process, considering dynamic changes in the environment and dough parameters. The parameterization of humidity zone regimes is performed, and the influence of technological variables on product quality and energy efficiency is analyzed. Schematics describing the control object – G4-PKhZS-25 oven – are presented.

Ref. 18, fig. 3, tab. 2.

UDK 656.61.052

Hvozdeva I., Myrhorod V., Zhekov B., Yermoshkin O., Grama G. **Study of TRO sensor characteristics during operation of ballast water treatment system** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.58 – 70.

A comparative analysis of methods and technologies used for ballast water treatment on board ships has been carried out. Experimental studies of the characteristics of TRO (total residual oxidant) sensors have been carried out during the operation of the ballast water treatment system Electro-Clean™ System in all modes of its operation (ballast, deballast and stripping). A new structure of the automatic control system has been proposed, which contains an additional circuit for automatic correction of TRO sensor values. Software for an additional programmable logic controller has been developed.

Bibl. 15, Il. 5, Tabl. 1

UDK 004.932

Kuhivchak V., Velhosh S. **Image color feature extraction methods review** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.71 – 84.

The main investigation examines twelve fundamental color feature extraction methods categorized into distinct approaches. Global methods include color histograms capturing overall color distribution patterns, histogram intersection measuring color distribution overlap, and color histogram for K-means clustering reducing dimensionality while preserving essential information. Local approaches incorporate spatial information through color correlograms expressing spatial correlation changes with distance, color co-occurrence matrices analyzing spatial relationships using convolution techniques, and color coherence vectors classifying pixels based on coherent region membership. Standardized MPEG-7 descriptors encompass dominant color descriptors providing compact representation and color layout descriptors utilizing discrete cosine transform for spatial encoding. Advanced mathematical methods include color moments employing statistical measures, Zernike chromaticity distribution moments offering rotation invariance, and quaternion Zernike moments enabling comprehensive analysis through quaternion algebraic framework.

Bibl. 20, Il. 2.

UDK 004.89

Berdnyk M., Starodubskiy I. **Self-profiling mechanisms for real-time code compilers** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.85 – 95.

This paper explores the concept of self-profiling compilers as a means of adaptive real-time code optimization. The approach relies on collecting dynamic performance metrics during program execution and analyzing the collected data to choose the most effective compilation strategies. We propose a compiler architecture capable of automatically detecting performance-critical code regions (hotspots), adjusting the configuration of optimization passes, and recompiling code with updated metrics. A prototype was implemented based on LLVM with an embedded runtime agent responsible for code instrumentation, metric collection, and interaction with a dynamic Pass Manager. A series of experiments were conducted across various hardware platforms, including desktop CPUs and ARM-based architectures. The results demonstrated significant performance gains without noticeable increases in compilation time or resource usage. These findings confirm the feasibility of integrating self-profiling into next-generation compilers targeting high-performance computing, edge systems, and mobile devices. The paper presents the concept of self-profiling as a tool for real-time code optimization. A prototype based on LLVM with embedded runtime analysis has been implemented. The results demonstrate the advantages of the proposed approach.

Bibl. 10.

UDC 004.91

Vizhutkin I.D., Likhouzova T.A. **Predicting user activity in video games** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.96 – 102.

The forecasting of user activity in video games is considered, which is currently an extremely relevant task and is of great importance for developers, publishers and analysts of the gaming industry. Accurate forecasting of the number of online players allows you to make strategic decisions regarding updates, marketing campaigns and project development, as well as optimize server capacity and resources. As part of this work, an analysis of historical and current data on online activity in games on the Steam platform was conducted. To solve the forecasting problem, the Gradient Boosting, LinearSVR machine learning methods, as well as (S)ARIMA(X) time series models were used. The result of the work can be used to forecast the number of online players in a game in a month based on historical and current parameters.

Bibl. 8, fig. 4, tab. 1.

UDC 539.374:004.89:004.942

Morozov Y., Zaytseva T. **Application of deep learning for improving the efficiency of solving contact mechanics problems by the finite element method** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.103 – 113.

The paper considers the integration of the finite element method (FEM) with deep learning techniques for solving contact mechanics problems. Classical FEM provides acceptable accuracy but requires significant computational resources when modeling complex systems and processes. The proposed approach uses FEM results obtained on a coarse mesh, followed by stress refinement through a feedforward neural network. It is demonstrated that this ap-

proach achieves accuracy comparable to fine-mesh solutions while significantly reducing computational complexity, thereby opening new opportunities for engineering applications.

Bibl. 12, Fig. 2, Tabl. 1.

UDC 004.056.5+004.056.55

Kozliuk I.O., Prokopovych-Tkachenko D.I. **Spatial modeling of information leakage risks in office networks: construction of a controlled zone** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.114 – 128.

The problem of the emergence of technical information leakage channels in office networks, caused by electromagnetic radiation from wireless devices, is considered. A spatial-mathematical model is proposed, based on the modified Khat model, taking into account the absorption coefficients of building materials and the exponential decay law. A methodology for constructing a vulnerability map based on a binary coverage matrix and optimizing the placement of information leakage sensors according to the criterion of maximum overlap, taking into account budget constraints, is formed. In the research case, it was found that for a frequency of 96.1 MHz and a power of 2.3 mW, the signal attenuation limit is formed at distances of more than 10 m, and the recommended controlled area is about 24×8.5 m. The proposed model provides a quantitative assessment of radio leakage risks and can be integrated into information security management systems in accordance with ISO/IEC 27005 standards and national regulations of the TZI. The practical significance of the method for government agencies, business centers and critical infrastructure facilities is shown.

Bibl. 30, Fig. 1, Table 2.

UDC 004.942

Zhadan A.A., Shynkarenko V.I. **Application of constructive-production modeling methods for forecasting deterministic time series** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.129 – 142.

This paper investigates the application of the constructive-production approach for synthetic deterministic fractal time series to reconstruct their constructive model, which is then used to forecast future values of the series. The method was compared with ARIMA, LSTM, ARIMA-LSTM, and CNN-LSTM, and accuracy was evaluated using MAE and MAPE metrics. The results showed that constructive-production modeling provides the highest accuracy among all tested models and allows the exploration of the internal structure and patterns of the time series.

Bibl.27, Fig.2, Tabl.3.

Malich M.H., Shcherbakov H.L., Laikov D.V., Herasymchuk V.O. **Intellectual information and measurement system of parameters of the technological process of combined power systems** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.143 – 148.

The article considers the development of an intelligent information and measurement system for the parameters of the technological process of combined energy systems, which is based on the concept of distributed energy generation. The actuality of the development is related to increasing the stability and reliability of energy systems in the context of man-made disasters and military conflicts. The purpose of the article is to justify the new structure and

features of the intellectual information and measurement system, taking into account the parameters of the technological process of combined energy systems. The intelligent information and measurement system is built using mathematical methods of technological process analysis based on modern element base and computer technologies. The utilisation of such a system enables the monitoring of the technological process of a combined energy system, increases the stability of technological equipment, and significantly improves operational efficiency.

Ref. 8, Fig. 3.

UDK 004.9:551.583:502

Kavats O.O. **Information technologies for satellite monitoring of sustainable development** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.149 – 156.

This article examines modern satellite monitoring information technologies and their application for supporting sustainable development in Ukraine. The concept of sustainable development is considered as a foundation for forming effective socio-economic and environmental policies, aimed at harmonizing economic growth, rational natural resource management, and environmental protection. Particular attention is given to the challenges of restoring natural complexes and effectively managing land, water, and forest resources, which have been exacerbated by intensive anthropogenic pressures and the consequences of the full-scale war.

The European experience of integrating satellite platforms, such as Copernicus, EO4SD/AgriSense, and GoldenRAM, is analyzed, demonstrating the high efficiency of comprehensive monitoring of environmental, agricultural, and industrial processes through the use of big data processing algorithms, artificial intelligence, and geospatial analytics. It is shown that the integration of satellite data with modern IT infrastructures enables operational control of ecosystem status, crop yield forecasting, water resource management, and assessment of ecological risks associated with mineral extraction.

The article identifies key challenges for the Ukrainian monitoring system, including insufficient national computing infrastructure, lack of standards for integrating heterogeneous data sources, and a shortage of qualified specialists. Conceptual approaches and methodologies for using satellite data to comprehensively assess the state of environmental and socio-economic systems in Ukraine are proposed.

It is substantiated that the implementation of these technologies will enhance the effectiveness of national sustainable development policies, increase transparency in decision-making, support post-war restoration and reconstruction of territories, ensure environmental safety, and promote food security at the national level.

Keywords: satellite monitoring, remote sensing, information technology, sustainable development goals, Copernicus, EO4SD, GoldenRAM, natural resources.

Bib. 11, Fig. 2.

UDC 004.042, 004.02, 004.67

Bozhukha D., Baibuz O. **A model of joint dynamic offloading of cloud architecture with load balancing of layers** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.157 – 162.

The paper considers the possibility of creating a hybrid system that includes a typical system of edge, fog, and cloud computing to study the issue of load optimization by redistributing part of the tasks between devices at the levels. A description of the model is provided, which combines the principles of design of edge, fog, and cloud computing. To verify the description of the constructed model, a model with a limited number of devices in its composition was used. An analysis of the obtained data on the relationship between the strategy and the load trajectory function of the cloud system was carried out.

Bibl. 3, ill. 0, table 0.

UDC 624.04

Hnatushenko V., Hryshchak D., Olevska Yu., Olevsky V., Udovyk I. **Methodology for data fusion of multichannel images** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.163 – 176.

A methodology for combining multichannel images is proposed to improve the accuracy of analysis, increase information content and reduce the impact of noise. The methodology is based on the use of mathematical models for harmonizing heterogeneous data, including algorithms for preliminary preprocessing, spectral analysis and machine learning. The adaptation of approaches for specific tasks is considered: combining remote sensing data for cartographic analysis and merging medical of different modalities for diagnostic purposes. The experiments conducted demonstrate an increase in the quality of results when using the proposed approach.

Bibl. 16, fig. 3.

UDC 621.314.26

Metelitsa A.O. **Control of DC voltage stabilization in alternative energy sources** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.177 – 190.

The work designs a digital control circuit for DC voltage stabilization, analyzes the design features and technical parameters of linear and pulsed serial DC voltage converters. Structural and functional diagrams are presented.

The basis of the study is the construction of structural and functional diagrams of a digital control circuit for DC voltage stabilization based on a 4-bit, 8-bit digital-to-analog converter with current control. Analysis of the results of simulation modeling of the influence of supply voltage ripple on the output voltage of the digital circuit showed the expected results, in particular, smooth start-up during regulation and a low level of ripple without the use of additional filters. The circuit and technical solutions include feedback control of the output voltage, which eliminated the temperature and time drift of parameters.

Bibl. 14, ill. 10.

UDC 622.28.044:622.831

Larionov H.I., Voloshko V.L. **Application of the method of successive approximation for image compression** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.191 – 198.

The problem of transmitting a large volume of information considered which requires significant power and capacity of the power source—both of which are limited. The operation of a wide range of machines and mechanisms has shown that the main limitation on their op-

erating time is the capacity of their power sources. All this necessitates a reduction in the operating time of the transmitter, which is the primary mode of energy consumption.

Thus, the task of increasing the operating time is associated with reducing the data transmission time. This can be achieved by decreasing the data volume, that is, through compression. A method for calculating the characteristics of the compression process is proposed. The influence of geometric and physical parameters on these processes is analyzed.

Bib. 5, ill. 7.

UDC 519.6:004.4:004.942

Mitikov N., Huk N. **Architecture of an expert system for analysing memory snapshots** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.199 – 211.

This paper proposes a rule-based expert system architecture designed to analyse software application memory snapshots in order to identify and eliminate inefficient memory usage. The system uses production rules based on knowledge about object types and their properties (in particular, immutability), allocation statistics, and object distribution in memory. A formal model for representing a memory snapshot as a set of objects with certain attributes has been developed, and criteria for identifying duplicates of immutable information and excessive memory reservation have been introduced. Mechanisms for grouping objects by type and value to diagnose data duplication are described, as well as methods for identifying inefficient allocations, in particular, excessive data structure size relative to their useful content. The system generates recommendations in the form of instructions for code optimisation, namely the implementation of caching or object pools, redistribution of data structures, etc. The system evaluates the expected memory savings. Mathematical formalizations are provided to describe the input data, grouping operations, filtering, and object comparison.

Bib. 12.

UDC 519.876.5+004.4'272+005.8

Selivorstova T., Zelentsov D., Romanko Y., Teslenko I. **Stochastic network–time PERT/CPM model with probabilistic rework for forecasting IT project completion times** // System technologies. N 6(161) - Dnipro, 2025.- P.212 – 227.

The paper addresses the problem of probabilistic estimation of IT project completion times under uncertainty in activity durations and repeated rework cycles after quality/acceptance checks. A stochastic network–time model based on PERT/CPM is proposed, where base activity durations are specified using PERT three-point estimates, and the rework mechanism is formalized through the probability of failing a control gate and a random rework duration (with an option to account for a learning effect). To obtain the distribution of the project completion time, Monte Carlo simulation is applied together with a network-based computation of early start/finish times. Percentile completion times (P50/P80/P90), the probability of meeting a given deadline, and measures of activity criticality and parameter sensitivity (tornado analysis) are computed. The proposed approach provides a more adequate assessment of schedule risks compared to deterministic plans and can be used to justify buffers and to prioritize quality and risk management actions in IT projects.

Bib. 10.

**Системні технології**  
**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**  
Випуск 6 (161)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

---

Здано до набору 01.12.2025. Підписано до друку 05.12.2025.

Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.

Умов. друк арк. – 17,5. Обл.–видавн. арк. – 15,312.

Тираж 300 прим. Замовл. – 06/25

---

Український державний університет науки і технологій,  
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,  
кафедра Інформаційних технологій та систем: ІВК «Системні технології»  
49600, Дніпро, а/с 493

<http://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

**Серія КВ № 8684 від 23 квітня 2004 рік**

## Редакційна колегія

**Селівьорстова Тетяна Віталіївна**  
(*головний редактор*)

доцент, кандидат технічних наук

**Алпатов Анатолій Петрович**

Член-кореспондент НАН України,  
професор, доктор технічних наук

**Архипов Олександр Євгенійович**

професор, доктор технічних наук

**Бабічев Сергій Анатолійович**

доцент, доктор технічних наук

**Білозьоров Василь Євгенович**

професор,

доктор фізико-математичних наук

**Гече Федір Елемирович**

професор, доктор технічних наук

**Гуда Антон Ігорович**

(*заст. головного редактора*)

професор, доктор технічних наук

**Гнатушенко Вікторія Володимирівна**

(*вчений секретар*)

професор, доктор технічних наук

**Гнатушенко Володимир Володимирович**

професор, доктор технічних наук

**Гожий Олександр Петрович**

професор, доктор технічних наук

**Єрьомін Олександр Олегович**

професор, доктор технічних наук

**Кіріченко Людмила Олегівна**

професор, доктор технічних наук

**Світличний Дмитро Святозарович**

професор, доктор технічних наук

**Скалозуб Владислав Васильович**

професор, доктор технічних наук

**Хандецький Володимир Сергійович**

професор, доктор технічних наук

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Інститут технічної механіки

НАНУ і ДКАУ, Україна

Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут» імені Ігоря Сікорського", Україна

Jan Evangelista Purkyně University

in Ústí nad Labem

Університет імені Яна Євангеліста Пуркіне, Усті над Лабем, Чеська Республіка

Дніпровський національний університет імені

Олеся Гончара, Україна

Ужгородський національний університет, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Національний технічний університет

«Дніпровська політехніка», Україна

Чорноморський національний університет імені

П.Могилы, Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій», Україна

Харківський національний університет

радіоелектроніки, Україна

Akademia Górniczo-Hutnicza

Краківська гірничо-металургійна академія ім. С.

Сташіца, Польща

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту» Україна

Дніпровський національний університет імені

Олеся Гончара, Україна