

Міністерство освіти і науки України

---

---

# Системні технології

System technologies

---

5 (154) 2024

---

*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 5 (154). - Дніпро, 2024. – 208 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.  
**Єрємін 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 31.01.2024 р., № 6

Адреса редакції: 49600, Дніпро, пр. Гагаріна, 4  
Український державний університет науки і технологій,  
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»  
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 «Інститут промислових та бізнес технологій»,  
ІВК «Системні технології», 2024

**Системні технології**  
**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**  
Випуск 5 (154)

Головний редактор: к.т.н., доц. Т.В. Селівьорстова

Технічний редактор та секретар збірки: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

---

Здано до набору 05.07.2024. Підписано до друку 08.07.2024.

Формат 60x84 1/16. Друк - різнограф. Папір типограф.

Умов. друк арк. – 14,86. Обл.–видавн. арк. –13,0.

Тираж 300 прим. Замовл. – 05/24

---

Український державний університет науки і технологій,  
ННІ «Інститут промислових та бізнес технологій»,  
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

Б.І. Мороз, А.С. Круглик, Д.М. Мороз, А.А. Мартиненко

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ І ЗАГАЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧІ ОБРОБКИ ПОВІДОМЛЕНЬ З УРАХУВАННЯМ ЇХ ЦІННОСТІ І СТАРІННЯ В СИСТЕМАХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

*Анотація.* Згідно з дослідженнями, провідні країни світу вже мають дорожню карту інтегрування безпілотних (літальних) систем у середньостроковій і довгостроковій перспективах у військовій сфері. Попит на системи масового обслуговування (СМО) безпілотних (літальних) апаратів зростає. У роботі розглянуто математичну модель СМО, в якій повідомлення характеризуються не лише граничним часом їх виконання, а й іншою важливою характеристикою – цінністю кожного окремого повідомлення в межах визначеного часу для даного типу черги. Запропоновано загальний алгоритм вирішення задачі. Розглянуто існуюче технічне рішення для раціонального розбивання алгоритму на модулі, для забезпечення гнучкості та адаптованості системи до впровадження інноваційних технічних рішень.

*Ключові слова:* математична модель, літальні апарати, алгоритм, об'єктно-орієнтоване програмування, наслідування, поліморфізм.

**Постановка проблеми.** З кожним роком і навіть місяцем стає видно, якими швидкими темпами відбувається розвиток безпілотних літальних апаратів і коло їхнього застосування. Мабуть очевидно, що в умовах повномасштабного збройного вторгнення російської федерації на територію України, літальні апарати, особливо безпілотні, відіграють надзвичайно важливу роль. Цілковито зрозуміло, що при веденні бойових дій, особливо у довгостроковій перспективі, матиме перевагу сторона, що зможе мінімізувати втрати особового складу. Як дуже вагомий фактор мінімізації втрат особового складу потрібно максимально впроваджувати технологізацію процесів та методів у ЗС України. Вже сьогодні ми можемо бачити, як починають використовувати і безпілотні літальні апарати, і безпілотні системи розмінування, наземні роботизовані комплекси і т. ін. Автори статті вважають, що це лише перші етапи розвитку безпілотних систем в межах трансформації ЗС. На сьогодні чимало науковців у світі залучено до розвитку військової галузі. Наприклад відомо, що вже сьогодні існує військова форма [4], що автоматично визначає фізичний стан військовослужбовця, де командир в автоматичному режимі може оцінити фізичний і, мабуть, психологічний стани підлеглих. Іншим вагомим прикладом автори вважають презентацію китайським технологічним гігантом безпілотного літаючого таксі, яке дозволяє перевозити до 2-х пасажирів на достатню відстань [5]. Аналог такої системи цілком міг би бути адаптованим, наприклад, до транспортування поранених з важко прохідних місць чи оперативної доставки боєкомплекту у місця ве-

дення активних бойових дій. Тобто автори припускають, що вже сьогодні розвиток збройних сил буде направлений на автоматизацію якомога більшої кількості процесів.

На сьогоднішній день використання безпілотних апаратів є хаотичним, без чіткої координації між підрозділами і бригадами. А також присутня лише мінімальна автоматизація. З появою більшої кількості безпілотних апаратів та їх різновидів за призначенням та тактико-технічними характеристиками (ТТХ), потреба в централізації обробки вхідної інформації від таких апаратів буде стрімко зростати. Розвиток цієї галузі автори вважають дуже стрімким і перспективним. Вже в сьогоднішніх реаліях за допомогою невеликих коптерів оператори стежать за ситуацією на полі бою в реальному часі. Такий коптер, при наявності успішних рішень стосовно його часу безперервного польоту, міг би виконувати завдання спостереження самостійно і реагувати на ситуації в залежності від заданих алгоритмів. Наприклад інформувати центральний пункт про зміни в поточній обстановці. Було б цілком вдалим рішення, наприклад, якщо б достатній за ТТХ літальний апарат міг самостійно доставляти боєкомплект в зону активних бойових дій.

Підводячи підсумок сказаного вище стає зрозуміло, з підвищенням рівня автоматизації і централізації процесів обробки інформації і прийняття рішень, виникає потреба у централізованій системі обробки вхідних вимог (заявок). Як видно з наведених прикладів, мова йде про динамічне середовище, де повідомлення характеризуються не тільки часом їх старіння, але й дуже важливою характеристикою – цінністю. Тому потрібно описати та розробити таку СМО, яка б задовольнила вказаним вимогам.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням створення та застосування наземних роботизованих комплексів було озвучене в [6,7]. Згідно з дослідженнями авторів провідні країни світу, такі як США, Велика Британія, Японія і т. д. активно займаються розробкою автоматизованих та автоматичних систем на основі штучного інтелекту (ШІ) у військовій сфері і навіть вже мають дорожню карту інтегрування безпілотних систем у середньостроковій і довгостроковій перспективах. Окремо б хотілось згадати роботу [8], де автори провели дослідження масового обслуговування з пріоритетами на залізничному транспорті в умовах ведення бойових дій. Але обрана модель пріоритетів може не задовольнити вимог динамічного середовища театру воєнних дій.

Подібну задачу, де обслуговування вхідних інформаційних потоків залежить від інтенсивності таких повідомлень ( $\lambda_{i\Delta t}$ ), автори розглядали в статті [1], де вхідні вимоги характеризувались критеріями старіння. В цій статті, як і в попередній, для організації обробки повідомлень використовується керована дисципліна [2,15]. Але в цьому дослідженні дисципліна буде враховувати не тільки старіння інформації, а і її цінність.

**Мета дослідження.** Опис загального алгоритму вирішення задачі організації обробки повідомлень з урахуванням їх цінності і старіння. Огляд існуючого технічного рішення для оптимального (раціонального) розподілення алгоритму на модулі.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Концептуальна модель СМО безпілотних (літальних) апаратів в умовах ведення бойових дій повинна забезпечувати максимальну гнучкість і адаптованість в умовах постійної зміни динамічного середовища. Окрім цього, така

СМО повинна забезпечити гнучкість налаштування і розширення завдяки постійному вдосконаленню існуючих рішень, та появи нових.

Як видно з Рис. 1, по вже існуючим технічним рішенням безпілотні літальні апарати можливо використовувати як системи спостереження і ситуативної обізнаності, де потоки повідомлень в різні моменти часу будуть мати різну інтенсивність а також можуть мати різну цінність в кожний окремих проміжок часу.

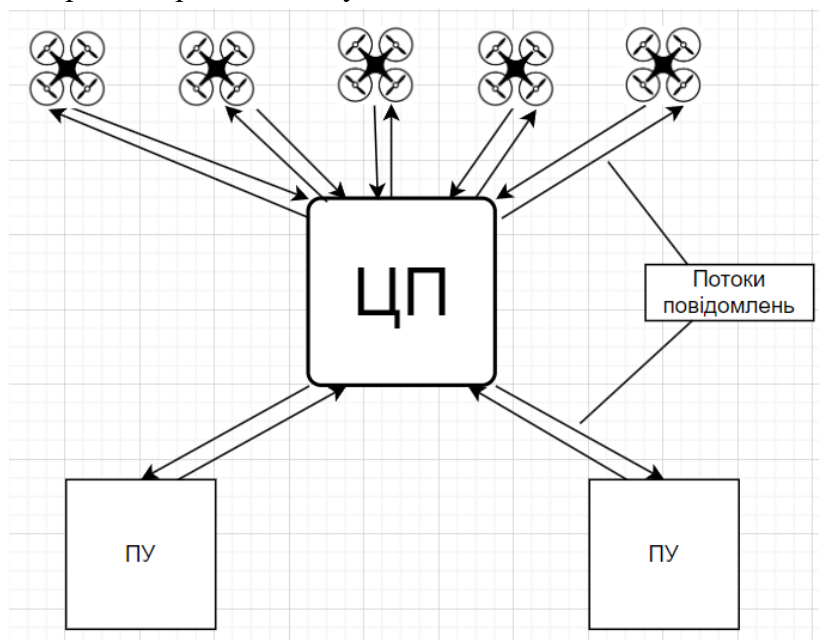


Рисунок 1 - Концептуальна модель організації обробки інформаційних потоків з використанням безпілотних(літальних) апаратів. ЦП – центральний пункт, ПУ – пункт управління (інформування, координування і т. д.)

На основі результатів, отриманих в [2,15], нижче сформульовано критерії оптимальної (раціональної) організації обробки потоків повідомлень, що функціонують в системі літальних апаратів множини  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$  з відповідними органами управління і прийняття рішень.

Згідно з концептуальною моделлю (див. рис. 1) множиною літальних апаратів  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$  генеруються повідомлення, які вимагають відповідної обробки. За аналогією в [2,15] сформулюємо вимоги до виконання операцій обробки повідомлень:

$$\begin{cases} (S_i^{\text{доп}} - S_i(t)) \rightarrow \max; \\ S_i(t) \leq S_i^{\text{доп}}; \\ |\Psi_i(t) - \Psi_i^{\text{max}}| \rightarrow \min; \\ \Psi_i(t) \leq \Psi_i^{\text{доп}}; \end{cases} \quad (1)$$

де,  $S_i(t)$  – старіння повідомлення  $i$ -го типу на момент часу закінчення обробки  $t$ ;

$S_i^{\text{доп}}$  – допустиме старіння повідомлення  $i$ -го типу;

$\Psi_i(t)$  – цінність повідомлення  $i$ -го типу на момент часу закінчення обробки  $t$ ;

$\Psi_i^{\text{max}}$  – максимальне значення цінності інформації  $i$ -го типу;

$\Psi_i^{\text{доп}}(t)$  – допустиме значення втрати цінності повідомлення  $i$ -го типу.

Використовуючи для організації обробки повідомлень керовану дисципліну Д1, що запропонована в [2,15] функції  $W_i(t)$  [2,15], на відрізьку часу  $\Delta t_n^j$  визначаються вектором управління.

$$T_{k, \Delta t_n^{(j)}} = \left\{ t_{k1, \Delta t_n^{(j)}} \dots, t_{ki, \Delta t_n^{(j)}} \dots, t_{kh, \Delta t_n^{(j)}} \right\}. \quad (2)$$

Ефективність обробки будь якого повідомлення максимальна тоді, коли момент закінчення обробки співпадає з часом його максимальної цінності  $t_k^i(t)$  де  $t$  – момент надходження повідомлення. В якості міри ефективності обробки  $j$ -тим елементом системи повідомлення  $i$ -й черги, що поступило в момент часу  $t$ , можна використовувати різницю між моментом часу  $t_k^i(t)$  і моментом закінчення обробки  $\tau_{\text{зак.обр.}i}(t)$ :

$$\phi_{\text{обр.}i}^{[j]}(t) = |t_k^i(t) - \tau_{\text{зак.обр.}i}(t)|, \quad (3)$$

$$\tau_{\text{зак.обр.}i}(t) = W_i(t) + b_i + t. \quad (4)$$

Тоді ефективність обробки повідомлень всієї  $i$ -ї черги визначиться наступним чином:

$$\phi_{\text{обр.}i}^{[j]} = \sum_{t=t_n^{(j)}}^{t=t_n^{(j)} + \Delta t_n^{(j)}} |t_k^i(t) - \tau_{\text{зак.обр.}i}(t)|. \quad (5)$$

Ефективність обробки повідомлень  $j$ -тим елементом:

$$\phi_{\text{обр.}i}^{[j]} = \sum_{i=1}^h \sum_{t=t_n^{(j)}}^{t=t_n^{(j)} + \Delta t_n^{(j)}} |t_k^i(t) - \tau_{\text{зак.обр.}i}(t)|. \quad (6)$$

Критерій виду (3, 4) зручно застосовувати в тому випадку, якщо функція зміни цінності в часі  $\Pi(t)$  всіх повідомлень, що обробляються, не визначені, а відомі лише значення  $t_k^i(t)$ .

Якщо  $\Pi(t)$  для усіх повідомлень, що обробляються, визначені, то доцільно використовувати критерій виду:

$$\phi_{\text{обр.}i}^{[j]} = \sum_{t=t_n^{(j)}}^{t=t_n^{(j)} + \Delta t_n^{(j)}} \Pi_{i,(t)}(\tau_{\text{зак.обр.}i}(t)), \quad (7)$$

де  $\Pi_{i,(t)}(\tau_{\text{зак.обр.}i}(t))$  цінність повідомлення  $i$ -ї черги, що поступило в момент часу  $t$  на момент закінчення його обробки.

$$\phi_{\text{обр.}i}^{[j]} = \sum_{i=1}^h \sum_{t=t_n^{(j)}}^{t=t_n^{(j)} + \Delta t_n^{(j)}} \Pi_{i,(t)}(\tau_{\text{зак.обр.}i}(t)). \quad (8)$$

Критерій наступного виду застосовується у випадку, якщо функції цінності повідомлень визначені у різних шкалах:

$$\phi_{\text{обр.}i}^{[j]} = \sum_{t=t_n^{(j)}}^{t=t_n^{(j)}+\Delta t_n^{(j)}} \omega_b^i \frac{|\Pi_{i,(t)}^{\text{max}} - \Pi_{i,(t)}(\tau_{\text{зак.обр.}i}(t))|}{\Pi_{i,(t)}^{\text{max}}}, \quad (9)$$

$\Pi_{i,(t)}^{\text{max}}$  – максимальне значення цінності повідомлень  $i$ -ї черги, що поступило в момент часу  $t$ ;

$\omega_b^i$  – ваговий коефіцієнт.

$$\phi_{\text{обр.}i}^{[j]} = \sum_{i=1}^h \sum_{t=t_n^{(j)}}^{t=t_n^{(j)}+\Delta t_n^{(j)}} \omega_b^i \frac{|\Pi_{i,(t)}^{\text{max}} - \Pi_{i,(t)}(\tau_{\text{зак.обр.}i}(t))|}{\Pi_{i,(t)}^{\text{max}}}. \quad (10)$$

Критерії, що враховують старіння інформації.

Критерій виду:

$$\phi_{\text{обр.}i}^{[j]}(t) = \tau_{\text{зак.обр.}i} - t_{i,(r)}(t), \quad (11)$$

$t_{i,(r)}$  – момент часу генерації повідомлень  $i$ -ї черги, що поступило в момент часу  $t$ ;

$$\phi_{\text{обр.}i}^{[j]} = \sum_{t=t_n^{(j)}}^{t=t_n^{(j)}+\Delta t_n^{(j)}} \tau_{\text{зак.обр.}i} - t_{i,(r)}(t); \quad (12)$$

$$\phi_{\text{обр.}i}^{[j]} = \sum_{t=t_n^{(j)}}^{t=t_n^{(j)}+\Delta t_n^{(j)}} (\tau_{\text{зак.обр.}i}(t) - t_{i,(r)}(t)); \quad (13)$$

Критерій виду:

$$\phi_{\text{обр.}i}^{[j]} = \sum_{i=1}^h \sum_{t=t_n^{(j)}}^{t=t_n^{(j)}+\Delta t_n^{(j)}} \omega_b^i \frac{S_{i,(t_r)}^{\text{max}} - S_{i,(t_r)}^{\text{max}}(\tau_{\text{зак.обр.}i}(t))}{S_{i,(t_r)}^{\text{max}}}, \quad (14)$$

де  $S_{i,(t_r)}^{\text{max}}$  – максимально допустиме старіння повідомлення  $i$ -ї черги з моментом генерації  $t_r$ ;

$S_{i,(t_r)}^{\text{max}}(\tau_{\text{зак.обр.}i}(t))$  – старіння повідомлення  $i$ -ї черги з моментом генерації  $t_r$ , що надійшло в обчислювальну систему в момент часу  $t$  і часом закінчення обробки  $\tau_{\text{зак.обр.}i}(t)$ ;

$$\phi_{\text{обр.}i}^{[j]} = \sum_{i=1}^h \sum_{t=t_n^{(j)}}^{t=t_n^{(j)}+\Delta t_n^{(j)}} \omega_b^i \frac{S_{i,(t_r)}^{\text{max}} - S_{i,(t_r)}^{\text{max}}(\tau_{\text{зак.обр.}i}(t))}{S_{i,(t_r)}^{\text{max}}}. \quad (15)$$

Таким чином, задача оптимальної (раціональної) організації обробки повідомлень в системі літальних апаратів і їх центрів прийняття рішень, може вирішуватися згідно сформу-

льованих вище вимог до обробки із використанням сформульованих критеріїв ефективності (3,15).

Підкреслимо, що сама ж задача організації обробки повідомлень за критеріями цінності і старіння полягає в тому, щоб знайти такі значення елементів  $t_{ki, \Delta t_n^{(j)}}$  вектора управління  $T_{k, \Delta t_n^{(j)}}$ , які б задовольняли сформульованим вимогам (1) і критеріям (3,15).

Очевидно, що знаходження значення вектора  $T_{k, \Delta t_n^{(j)}}$  можна вирішити методом прямого перебору всіх варіантів  $T_{k, \Delta t_n^{(j)}}$ . Однак, через велику кількість варіантів перебору, повним перебором цю задачу вирішити в більшості випадків складно. Тому автори пропонують використовувати евристичні алгоритми, які б дозволяли зменшувати кількість варіантів перебору. Такі алгоритми автори планують розглянути в подальших своїх публікаціях.

Загальний алгоритм по управлінню системою літальних апаратів з використанням запропонованих вище методів організації обробки інформаційних потоків може виконуватись з використанням наступних операцій і в наступній послідовності:

1. Визначення структури мережі літальних апаратів і їх центрів управління і прийняття рішень на інтервалі часу, для якої буде використовуватись управління. Виконує центральний елемент системи.

2. Декомпозиція мережі на окремі підсистеми і визначення центрального елемента для кожної підсистеми. Виконує центральний елемент системи.

3. Видача центральним елементом системи команд підпорядкування визначеним центральним елементом підсистеми. Виконує центральний елемент системи.

4. Видача центральними елементами підсистем команд підпорядкування рядовим елементам системи. Виконують центральні елементи підсистем.

5. Визначення стану інформаційних потоків, що вимагають обробки, на відрізок часу  $\Delta t_n$ . Виконують центральні елементи підсистем.

6. Організація обробки повідомлень з використанням дисципліни Д1 в рамках окремих елементів підсистем і формування векторів, що не включені в обробку інформаційних потоків, а також векторів зайвих обчислювальних потужностей окремих елементів підсистем. Виконують окремі елементи підсистем.

7. Розподіл обчислювальних ресурсів в рамках окремих підсистем. Виконують центральні елементи підсистем.

Другою частиною поставленої мети є огляд існуючого технічного рішення для оптимального (раціонального) розподілення алгоритму СМО на модулі. Це питання є важливим по декільком причинам:

- Концептуальна модель не є вичерпною. З появою інноваційних рішень цілком законно, що інтенсивність потоку повідомлень  $\lambda$  а також інтенсивність обробки кожного типу повідомлення -  $\mu$  може змінюватись. СМО повинна забезпечувати адаптивність.

- Мати можливість додавати нові модулі «на льоту». В умовах динамічного середовища це дуже важливий критерій. Це дозволить працювати з новим обладнанням (невідомим на сьогодні) без необхідності переписувати, та перезбирати вже існуючу систему керування.

- Розбивання на модулі дозволить розпаралелити процес розробки програмного забезпечення.
- Кожен модуль може бути окремо протестований для виявлення помилок (багів) саме в конкретному функціоналі.
- Виникнення критичних помилок в роботі ПЗ конкретного модуля управління не повинно впливати на роботу інших частин системи.

Розглянемо приклад. Центральний пункт вміє обробляти три типи повідомлень: пошук мін, пошук ворожих вогневих точок, евакуацію поранених. Безпілотний літальний апарат спостереження виявляє ворожу міну з інтервалом кожні 4 години. Повідомлення потрапляє у центральний пункт – ПЗ, яке аналізує вхідне повідомлення і приймає рішення стосовно способу виконання розмінування. Припустимо, система вміє розмінувати ворожі міни на суходолі двома способами: перший – розмінування безпосередньо сапером. Нехай розмінування сапером займає 5 годин на кожен міну. Другий спосіб – використання літаючого апарату із самопідривом. Такий спосіб обробки вхідної заявки виконується, наприклад, 20 хв. і може працювати лише в умовах ясної погоди. Виходячи з цього, розроблене ПЗ повинно вміти обробляти таку заявку двома способами, в залежності від критеріїв узгодження з боку пункту управління.

Як видно з рис. 2 базовий модуль повинен залишатися відкритим для розширення. Це дозволяє легко додавати нові рішення у вже існуючу архітектуру, наприклад при появі нових способів розмінування. Але при цьому залишати базовий функціонал незмінним. Така архітектура дозволить паралельно розробляти алгоритми для кожного із існуючих способів розмінування.

З точки зору центрального пункту, немає різниці яким способом буде виконано розмінування. Важливо лише час і статус успішності виконання вимоги.

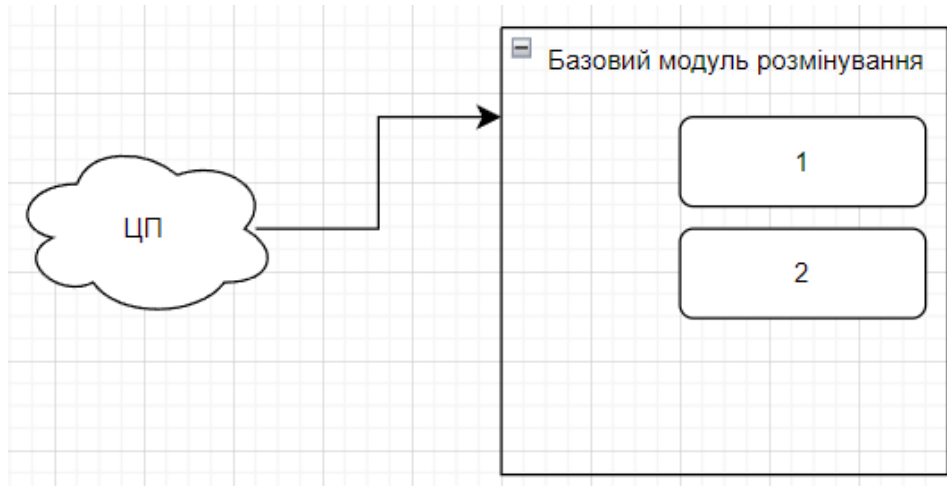


Рисунок 2 - Типова схема способу організації обробки вхідних вимог типу «розмінування», де «1» і «2» безпосередні способи розмінування що можуть виконуватись системою

Вирішення подібної задачі здається логічним за допомогою таких концепцій об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) як наслідування і поліморфізм. Ці концепції ООП дозволяють розробляти таку архітектуру ПЗ, яку можливо буде використовувати тут і зараз, розширювати, вдосконалювати, модифікувати чи змінювати конкретну логіку обробки і при

цьому не змінювати саму архітектуру. Побудова архітектури ПЗ з використанням основних концепцій ООП дозволить максимально швидко розробляти драйвери (в даному контексті - програми, алгоритми керування) для вже існуючих рішень, а також залишитись відкритим для внесення перспективних рішень. Окрім того, такий підхід дозволить максимально якісно виконати процес тестування.

Розглянемо абстрактний приклад обслуговування повідомлення розмінування на мові програмування C++.

```
enum status {FAIL = 0, SUCCESS = 1}; //статуси виконання завдання
class MineClear
{
public:
    bool virtual Run() = 0;
    virtual ~MineClear() {}
};

class MineClearFPV : public virtual MineClear
{
public:
    bool virtual Run() override
    {
        //clearing a mine
        return SUCCESS;
    }
    virtual ~MineClearFPV() {}
};

class MineClearSapper : public virtual MineClear
{
public:
    bool virtual Run() override
    {
        //clearing a mine
        return SUCCESS;
    }
    virtual ~MineClearSapper() {}
};

int main()
{
    enum ClearType
    {
        sapper,
        drone
    };
    MineClear* ptr = nullptr;
    short clearType = drone;
    short status = -1;
```

```
switch (clearType)
{
case sapper:
    ptr = new MineClearSapper();
    break;
case drone:
    ptr = new MineClearFPV();
    break;
default:
    break;
}
if (ptr)
{
    status = ptr->Run();
}

delete ptr;
return status;
}
```

В даному прикладі, абстрактний базовий клас `MineClear` реалізує функціональність розмінування. Для простоти сприйняття автори показали в ньому лише 1 функцію, але звичайно цей клас містить в собі увесь базовий функціонал обробки повідомлення розмінування. Далі від нього унаслідуються 2 класи `MineClearFPV` та `MineClearSapper`, які безпосередньо реалізують повний цикл обробки конкретного повідомлення конкретним способом. Вираз `short clearType = drone;` слід розглядати лише як наглядний приклад. В реальних умовах ця характеристика і буде визначати спосіб обробки повідомлення. Змінна `status` інформує систему про статус виконання вимоги. Зверніть увагу, така архітектура дозволить розробляти логіку для кожного зі способів виконання заявки паралельно, а отже, і тестування кожного конкретного рішення можна виконувати незалежно від іншого.

При даному архітектурному підході до розробки ПЗ ми можемо додавати нові модулі чи способи обробки повідомлень на основі нових технічних рішень і при цьому самий базовий підхід жодним чином не буде змінений.

Приклад. В процесі вдосконалення технічних рішень з'являється перспективний безпілотний наземний дрон розмінування. Для використання такого дрона в СОД, достатньо лише додати клас виконання вимоги `MineClearLand`, і розширити логіку вибору обробки такої вимоги, до можливості використання такого способу обробки повідомлень.

```
class MineClearLand : public virtual MineClear
{
public:
    bool virtual Run() override
    {
        //clearing a mine
        return SUCCESS;
    }
    virtual ~MineClearLand () {}
}
```

```
};  
switch (clearType)  
{  
...  
    case droneLand:  
        ptr = new MineClearLand();  
        break;  
}
```

Як видно з прикладу, розробка нового ПЗ для вирішення задачі жодним чином не впливає на роботу вже існуючих рішень і забезпечує, окрім сказаного, мінімізацію перекомпіляції/перезбирання усєї системи. В даному випадку достатньо лише знову зібрати модуль розмінування.

**Висновки.** В роботі визначено та сформульовано критерії оптимальної (раціональної) організації обробки потоків повідомлень, що функціонують в системі літальних апаратів. Розглянуто існуюче технічне рішення для оптимального (раціонального) розподілення алгоритму СОД на модулі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Мороз Б. І., Круглик А. С., Мороз Д. М., Мартиненко А. А. Математична модель раціональної організації обробки інформаційних потоків в системі доставки літальними апаратами. *System technologies*. 2024. Т. 2, № 151. С. 3–12. doi: 10.34185/1562-9945-2-151-2024-01
2. Свиридов В.В., Мороз Б.И. Организация процессов обработки информации по критериям ценности и старения в АСУ. Харьков: Основа, 1992. 112 с.
3. Shvachuch G. G., Moroz B. I. Pobochii I. A., Sushco L. F., Busydin V. V. *Комп'ютерне моделювання та оптимізація складних систем*. Матеріали 4 Міжнародної науково – технічної конференції (Дніпро, 1-2.11.2018) / уклад. кафедра інформаційних систем ДВНЗ УДХТУ. Дніпро : Баланс-Клуб, 2018. С. 196 – 199.
4. Екзоскелети як сучасні бойові обладунки: Україна поки що ігнорує цей тренд / Defense-Express: веб-сайт. URL: [https://defence-ua.com/weapon\\_and\\_tech/ekzoskeleti\\_suchasni\\_bojovi\\_obladunki\\_ukrajina\\_poki\\_scho\\_ignoruje\\_ts\\_ej\\_trend-805.html](https://defence-ua.com/weapon_and_tech/ekzoskeleti_suchasni_bojovi_obladunki_ukrajina_poki_scho_ignoruje_ts_ej_trend-805.html). (дата звернення: 19.03.2024)
5. “Облетіти” затори стало реально: у Китаї запускають безпілотні літаючі таксі /За кордоном: веб-сайт. URL: <https://newsauto.com.ua/za-kordonom/obletity-zatory-stalo-realno-u-kytavi-budut-bezpilotni-litayuchi-taksi/>. (дата звернення: 02.04.2024)
6. Залипка В. Д. Аналіз та синтез класифікаційних ознак засобів взаємодії із зовнішніми об'єктами та середовищем багатоцільових роботизованих платформ для подальшої їх трансформації. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. 2023. Т. 2, №. 2. С. 21-33. doi:10.46299/j.isjea.20230202.03.
7. Залипка В. Д. Особливості створення та застосування наземних роботизованих комплексів у провідних країнах світу та Україні. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2022. №4. С. 60–65. doi: 10.36930/40320410.
8. Кацман М. Д., Мацюк В. І., Мироненко В. К. Моделювання надійності транспорту в екстремальних умовах функціонування як системи масового обслуговування з пріоритетами. *Системні технології*. 2023. Т. 1, № 149. С. 10–15. doi: 10.34185/1562-9945-1-149-2023-01

стемі управління, навігації та зв'язку. *Збірник наукових праць*. 2023. № 73. С. 10-17. doi: 10.26906/SUNZ.2023.3.010.

9. Методи моделювання бойових дій військ (сил): навч. посіб. / Т. П. Пащенко, С. А. Микусь, В. Г. Солонніков та ін. – Київ: НУОУ ім. Івана Черняхівського, 2021. 262 с.

10. Чигінь В. І. Створення комп'ютерних засобів керування автономним літальним апаратом з застосуванням дистанційних хмарних обчислень. *Комп'ютерні системи та мережі*. 2021. Т. 3, № 1. С. 106-113. doi: 10.23939/csn2021.01.106.

11. Пуйда Д. В. Модифікація алгоритму пула потоків з багатьма чергами. *Комп'ютерні системи та мережі*. 2023. Т. 5, № 1. С. 96-102. doi: 10.23939/csn2023.01.096.

12. Обшта А. Ф., Бугаєць В. В. Комплексний алгоритм для системи програмного обслуговування логістики гуманітарних послуг. *Комп'ютерні системи та мережі*. 2023. Т. 5, № 1. С. 79-88. doi: 10.23939/csn2023.01.079.

13. Сучасні системи автоматичного керування технологічними комплексами: навч. посіб. / А. М. Сільвестров, М. Я. Островерхов та ін. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 386 с.

14. G. Myers. The art of software testing. Second Edition: tutorial. Hoboken, New Jersey: Published by John Wiley & Sons, Inc., 2004. 255 p.

15. Мороз Б. И. Методы и средства организации процессов обработки информации по критериям ценности и старения в системах автоматизированного управления и информационного обслуживания: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук, Днепропетровский государственный университет, Днепропетровск, 1992 г. 358 с.

#### REFERENCES

1. B. Moroz, A. Kruhlyk, D. Moroz, A. Martynenko. Mathematic model of the rational organization of the information flows processing in aircraft delivery system. *System technologies*. 2024. Т. 2, № 151. pp. 3–12. doi: 10.34185/1562-9945-2-151-2024-01.

2. V. Sviridov, B. Moroz. Organization of information processing processes according to the criteria of value and aging in automated control systems. Kharkiv: Osnova, 1992. 112 p.

3. Shvachych G. G., Moroz B. I. Pobochii I. A., Sushco L. F., Busydin V. V. *Computer modeling and optimization of complex system*. 4-th International scientific-technical conference. (Dnipro, 1-2.11.2018) / prod. by the the Department of Information Technology SHEI USCaTU. Dnipro : Balance-Club, 2018. pp. 196 – 199.

4. Exoskeletons as modern combat armor: Ukraine ignores this trend so far. / Defense-Express: website. URL: [https://defence-ua.com/weapon and tech/ekzoskeletoni suchasni bojovi obladunki ukrajina poki scho ignoruje tej trend-805.html](https://defence-ua.com/weapon%20and%20tech/ekzoskeletoni%20suchasni%20bojovi%20obladunki%20ukrajina%20poki%20scho%20ignoruje%20tej%20trend-805.html). (date of app: 19.03.2024)

5. "Flying around" traffic jams has become a reality: unmanned flying taxis are being launched in China / Abroad. Website. URL: <https://newsauto.com.ua/za-kordonom/obletity-zatory-stalo-realno-u-kytayi-budut-bezpilotni-litayuchi-taksi/>. (date of app: 02.02.2024).

6. V. Zalyпка. Analysis and synthesis of classification signs of the means of interaction with external objects and the environment of multipurpose robotic platforms for their further transformation. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*. Vol. 2, №. 2, 2023, pp. 21-33. doi:10.46299/j.isjea.20230202.03.

7. V. Zalyпка. Peculiarities of the creation and use of ground robotic complexes in the leading countries of the world and Ukraine. *Scientific Bulletin of UNFU*. №4, 2022, pp. 60–65. doi: 10.36930/40320410.
8. M. Katsman, V. Matsyuk, V. Myronenko. Modeling the reliability of transport under extreme conditions of operation as a queuing system with priorities. *Control, Navigation and Communication Systems*. № 73, 2023. pp. 10-17. doi: 10.26906/SUNZ.2023.3.010.
9. Methods of modeling combat operations of troops (forces): tutorial. / T. Pashchenko, S. Mykus, V. Solonnikov and oth. / – Kyiv.: NDUU named after Ivan Chernyakhovskiy, 2021. 262 p.
10. V. Chyhin. Creation of computer facilities for controlling an autonomous aircraft with the use of remote cloud calculations. *Computer systems and networks*. Vol. 3, № 1, 2021. pp. 106-113. doi: 10.23939/csn2021.01.106.
11. D. Puida. Modification of a thread Pool algorithm with multiple task queues. *Computer systems and networks*. Vol. 5, № 1, 2023. pp. 96-102. doi: 10.23939/csn2023.01.096.
12. A. Obshta, V. Buhaiets. Cross-platform software system for the logistics of humanitarian services. *Computer systems and networks*. Vol. 5, № 1, 2023. pp. 79-88. doi: 10.23939/csn2023.01.079.
13. Modern systems of automatic control of technological complexes: tutorial. / A. Silvestrov, M. Ostroverkhov and oth. – Kyiv: KPI named after Igor Sikorsky, 2023. 386 p.
14. G. Myers. The art of software testing. Second Edition: tutorial. Hoboken, New Jersey: Published by John Wiley & Sons, Inc., 2004. 255 p.
15. B. Moroz. Methods and means of organizing information processing processes according to the criteria of value and aging in automated control and information service systems: dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences, Dnepropetrovsk State University, Dnepropetrovsk, 1992. 358 p.

Received 01.05.2024.  
Accepted 03.05.2024.

***Mathematical model and general algorithm for solving the problem of processing messages taking into account their value and aging in aircraft systems***

*According to research, the world's leading countries, such as the USA, Great Britain, Japan, etc., are actively engaged in the development of automated and automatic systems based on artificial intelligence (AI) in the military sphere and even already have a roadmap for the integration of unmanned systems in the medium and long term prospects.*

*The purpose of this work is to describe a general algorithm for controlling an aircraft system with using controlled discipline taking into account the value characteristics of messages. In addition, an overview of the existing technical solution for the rational division of the algorithm into modules is offered.*

*In the paper considers a mathematical model of the mass service system, where the messages are characterized not only by limit time of execution, but also by another important characteristic - the value of each individual message in the same type of queue. The authors proposed a definition of the efficiency of message processing by system elements. The authors believe that a such model can be quite relevant with the development of unmanned (aircraft) vehicles in the structure of the armed forces of Ukraine. It is especially relevant and appropriate in conditions of active combat*

*operations, where the real situation is very dynamic and the messages entering to the system have different values within the same period of time. The existing technical solution for the optimal (rational) division of the algorithm into modules is considered. This will allow to parallelize the software development process, test individual modules and make changes in accordance with the latest technical solutions without the need to change the entire system architecture.*

**Мороз Борис Іванович** - доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

**Круглик Андрій Сергійович** – здобувач вищої освіти рівня доктор філософії, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

**Мороз Дмитро Максимович** – доктор філософії, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

**Мартиненко Андрій Анатолійович** – доктор філософії, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка».

**Boris Moroz** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Professor at the Department of Software Engineering, Dnipro University of Technology.

**Andrii Kruhlyk** – PhD student, Dnipro University of Technology.

**Dmytro Moroz** -Doctor of Philosophy (PhD), Associate Professor of the Software Engineering Department, Dnipro University of Technology.

**Andrii Martynenko** - Doctor of Philosophy (PhD), Associate Professor of the Software Engineering Department, Dnipro University of Technology.

## INTEGRATION AND USE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR AUTOMATED MACROS CREATION

*In today's world, automation and optimization of work processes are becoming key success factors. This work examines the combination of automation systems and artificial intelligence (AI) and their impact on the optimization of work processes. The technology of integration into the process automation system and learning of a large language model for the automated creation of macros using the example of the author's software "Draw & GO" has been developed and proposed.*

*Keywords: automation and optimization of workflows, macro, human-machine interaction, artificial intelligence, LLMs, Prompt Engineering, computerized devices.*

**Statement of the problem.** In today's increasingly valuable world, automation and workflow optimization are becoming key success factors. Systems that allow you to automate routine tasks and organize work significantly increase productivity and efficiency.

The system of automation and organization of work processes includes:

- Macros are sets of commands that automate repetitive tasks. They can be used to automate almost any task that can be done manually, from data entry to text formatting.
- Workflow programs are more complex systems that allow you to automate entire task chains. They can include conditional statements, loops, and other logical elements, making them more flexible and powerful than macros.

«Draw & GO» [1] is an innovative cross-platform workflow system that is built on the microkernel onion architecture [2] of plugins using .NET MAUI and Blazor technologies [3], implements interaction based on graphic gesture recognition [4], allows users to create powerful and secure workflows customized according to the needs and preferences of each client based on specific conditions, actions and triggers in a secure environment of industry standards.

A relevant area of research is the use of artificial intelligence in automation and workflow systems, which is based on a number of key factors:

1. **Data Growth:** The world is generating unprecedented amounts of data that humans cannot analyze on their own. AI makes it possible to process and interpret this data, revealing hidden patterns and gaining valuable insights.
2. **Personalized experiences:** AI enables you to create personalized experiences for users based on their individual needs and preferences. This leads to better customer engagement and loyalty.
3. **Improved decision-making:** AI can aid in better decision-making by providing data-driven analytics and predictions. This leads to better results in business, science, and other areas.

The combination of automation and workflow systems with AI makes them extremely powerful tools that can significantly improve operational efficiency in various areas:

1. Automate complex tasks: AI can be used to automate complex tasks that previously required human intervention. For example, AI can be used to:

- Data analysis: AI can automatically analyze large amounts of data to identify patterns and make predictions. This can be used to automate tasks such as demand forecasting, fraud detection, and price optimization.

- Natural Language Processing: AI can be used to understand and generate human language. This can be used to automate tasks such as customer service, report writing, and text translation.

- Computer vision: AI can be used to analyze images and videos. This can be used to automate tasks such as quality control, object recognition, and robot navigation.

2. Adaptive automation: AI can be used to create adaptive automation programs that can self-learn and adjust as they work.

3. Increased productivity: AI can be used to improve the productivity of automation applications. This will help in reducing the time and errors that may occur when manually completing tasks.

AI applications are becoming more accessible and versatile. They are used by a wide range of organizations, from small businesses to large corporations, as well as government and non-profit organizations.

This article discusses the possibilities of using AI in process automation systems to improve their capabilities using the example of the "Draw & GO" system.

**Analysis of the latest research and publications.** Today's important advances in artificial intelligence are large language models (LLMs) and Prompt Engineering technologies [5-6]. Some of the most popular large language models include:

- OpenAI GPT (Generative Pre-trained Transformer) is known for its ability to generate coherent, informative text based on the instructions it receives;

- Gemini, which is an attempt to create a more versatile and efficient language model capable of adapting to a variety of language processing tasks;

- Facebook AI LLaMa, which is also a high-performance model designed for a variety of applications in the field of natural language processing.

With the advent of language models, the term Prompt Engineering emerges. Prompt Engineering is a relatively new discipline for developing and optimizing prompts for the effective use of language models for a wide range of applications and research topics [7].

Some of the most popular Prompt Engineering techniques are:

- Prompt chaining is a method where a task is broken down into subtasks in order to create a chain of operational operations [8].

- Few-shot learning is a method that allows a language model to learn from a small number of examples. This method can be used to train a language model to perform new tasks for which there is not a lot of data [9].

- Zero-shot learning is a method that allows a language model to perform tasks without having any training data. This method uses the knowledge that the language model has gained during previous training in order to generalize to new tasks [10].

**Objective.** The purpose of this work is to investigate the combination of automation and AI systems and their impact on the optimization of workflows, to review existing solutions, to identify key factors that affect the successful combination of automation systems and AI, to propose a technology for integrating and training a large language model for automated creation of macros in a process automation system, to implement practical testing of the proposed technology in the "Draw & GO" system, develop recommendations for the effective use of automation systems and AI to optimize workflows.

**Presentation of the main material of the research.** In this work, the technology of integration and training with hints of the language model into process automation systems has been developed on the example of the "Draw & GO" automation system.

The proposed technology allows users to build workflows, describing only the requirements for them, without the need to delve into knowledge of programming or even the system itself, and consists of the following steps:

1. Choosing a language model of artificial intelligence. After analyzing the integration capabilities of LLMs, it was found that Open AI provides the easiest way to use it, so let's consider this particular language model. Currently, AI from Open AI offers two popular models: GPT-3.5 and GPT-4. While both models are based on transformation architecture, GPT-4 tentatively shows more improvements in accuracy, master learning ability, and pattern recognition. However, GPT-4 is a more expensive and slower model because it provides a more detailed answer. After comparing both models and the quality of the result, it was chosen to use the GPT-3.5 model.

2. We connect libraries to work with Open AI. To connect the model, the OpenAI Sdk NuGet package was used [11].

3. We carry out prompt engineering in order to train the AI model to understand the system. It is necessary to conduct several experiments to determine which prompt engineering techniques are best to apply and what information will be sufficient to return the correct data. For example, to integrate AI with the Draw & GO system, the following instructions for using each macro command were developed:

- 3.1. We provide a basic role so that the system adapts the answers as if it were an expert in the field. Prompt: *"You know how to use Draw & GO plugins"*.

- 3.2. We provide a list of macros available in the system so that the language model returns results that Draw & GO will understand. Prompt: *«You know such plugins as: Start, Search, ConsoleLog, SendEmail, Text, Number, Boolean»*.

- 3.3. We provide basic information about the macro command. Prompt: *«Each plugin has its own set of parameters. The parameter has its name, type, and value. The parameter name is a string. The parameter value is an object. The parameter type is a string. The parameter type can be one of the following: string, number, boolean, or any.*

*Each plugin has its own set of Connectors. There can be input and output connectors. Input connectors are used to connect plugins. Output connectors are used to connect plugins. Output connectors can only be set to input connectors».*

3.4. We provide detailed information about each parameter for each macro command. Prompt: *«The start plugin has no input connectors. The start plugin has one output connector. The start plugin has no parameters.*

*The start plugin has a single output parameter with the name Start.*

*The search plugin has one input connector with the name In. The search plugin has one output connector with the name Out. Search plugin has 2 parameters: Search (with type string) and SearchProvider (with type string).*

*ConsoleLog plugin has one input connector with the name In. The search plugin has one output connector with the name Out. Console plugin has 1 parameter: Message (with type string). »*

3.5. If necessary, we provide constraints or rules for the overall system, which will help narrow down the answer to a more accurate result. Prompt: *«Macros must contain one and only one Start plugin. It's the start of the flow execution. »*

3.6. We provide information about what requests will be made and how the system will be used. Prompt: *«The user will ask you to generate a flow diagram for Draw & GO plugins in general format. You will need to understand the user's request and generate a flow diagram for Draw & GO plugins. »*

3.7. Set the view in which you expect to get the result. Prompt: *«In output, you must provide a valid JSON object with plugins and links (connectors). Example valid output:*

```
{
  "name": "Weather in Dnipro",
  "macroCommands": [{
    "Type": "DrawGo.Plugin.Essentials.Extensions.Start",
    "Id": "68B34584-7649-4582-974F-FA8608570D58",
    "Position": "0:0",
    "FieldData": []
  },{
    "Type":
"WebExtensions.SearchMacroCommand.SearchMacroCommand",
    "Id": "E7625C90-C643-4CA7-B093-7374BE9DBC71",
    "Position": "199:266",
    "FieldData": [
      {"DataType": 5,"Key": "Search","Value": "Weather in
Dnipro"},
      {"DataType": 5,"Key": "SearchProvider", "Value":
"Google"}]]],
  "links": [{
    "DestinationKey": "In",
    "DestinationNode": "E7625C90-C643-4CA7-B093-
7374BE9DBC71",
    "SourceKey": "StartFlow",
    "SourceNode": "68B34584-7649-4582-974F-FA8608570D58"
```

}]

}»

3.8. After the general settings, the system is ready to accept commands from users. It should be emphasized that users do not need to have deep technical knowledge or learn complex command syntax to form these commands.

The system is designed to use ordinary human language to formulate queries, similar to how people type queries into search engines like Google. For example, the user can simply type "open mail" or "launch music player", and the system recognizes and executes these commands accordingly. An example of such a command would be:

*«Generate a flow diagram for Draw & GO plugins.*

*I want to search for a Smart Home in Bing. I want to write a log message with text containing the current date and time. »*

As a result, we get the following answer (Fig. 1):

```
{
  "name": "Smart Home Search and Log",
  "macroCommands": [
    {
      "Type": "DrawGo.Plugin.Essentials.Extensions.Start",
      "Id": "1",
      "Position": "0:0",
      "FieldData": []
    },
    {
      "Type": "WebExtensions.SearchMacroCommand.SearchMacroCommand",
      "Id": "2",
      "Position": "200:100",
      "FieldData": [
        {"DataType": 5, "Key": "Search", "Value": "Smart Home"},
        {"DataType": 5, "Key": "SearchProvider", "Value": "Google"}
      ]
    },
    {
      "Type": "DrawGo.Base.Extensions.Logs.ConsoleLog",
      "Id": "3",
      "Position": "400:200",
      "FieldData": [{"DataType": 5, "Key": "Message", "Value": "Current Date and Time"}]
    }
  ],
  "links": [
    {
      "DestinationKey": "In",
      "DestinationNode": "2",
      "SourceKey": "StartFlow",
      "SourceNode": "1"
    },
    {
      "DestinationKey": "In",
      "DestinationNode": "3",
      "SourceKey": "Out",
      "SourceNode": "2"
    }
  ]
}
```

Figure 1 - AI-generated result

The result obtained in the "Draw & GO" system is automatically converted into a macro that can be used in the future (Fig. 2):

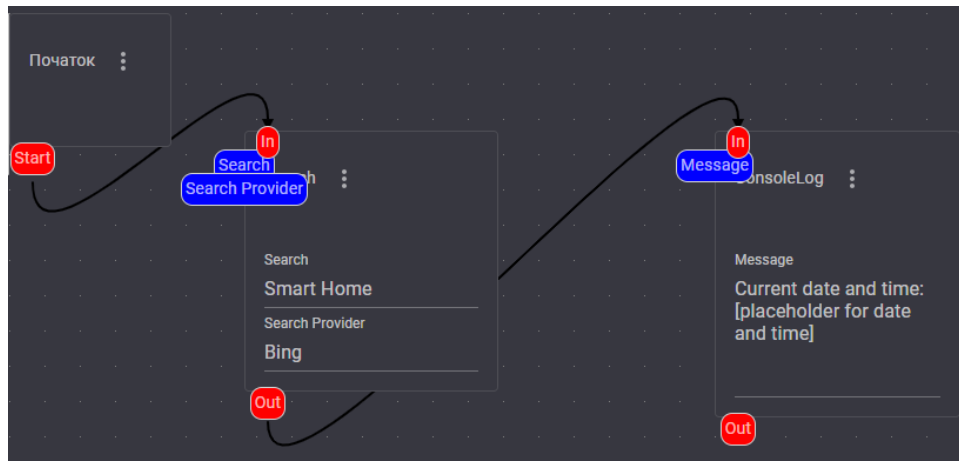


Figure 2 - Macro generated by artificial intelligence in the "Draw & GO" system

**Conclusions.** This paper proposes a technology for integrating and training a language model for automated creation of macros in the context of the author's software "Draw & GO". The use of AI significantly expands the capabilities of users and makes the development of customer-oriented applications more intuitive and accessible. The combination of automation and AI systems has great potential to streamline workflows and increase productivity. AI can help automate complex tasks, improve decision-making, and create personalized experiences for users. It's important to choose and implement the right automation and AI systems to get the most out of your investment. This research will help to improve the understanding of the potential of combining automation and AI systems to optimize workflows. The results of the study can be used to develop more efficient and effective automation and AI systems. The study's recommendations will help organizations of all sizes and industries successfully implement automation and AI systems to optimize their workflows.

Further research in this area may focus on developing new methods and algorithms for automating workflows using AI, studying the impact of combining automation systems and AI on the workforce and society as a whole, and developing ethical norms and guidelines for the use of AI in work processes.

## REFERENCES

1. Draw & GO, URL: <https://drawgo.azurewebsites.net>.
2. Antonyuk V., Sydorova M. (2021) Synthesis of software architectures for cross-platform application development. *Actual problems of automation and information technology*. Vol.25. PP. 3-12. DOI: 10.15421/432101
3. Antonyuk V., Sydorova M. (2022) A Cross-Platform Mobile Development for accelerating software development lifecycle. *Actual problems of automation and information technology*. Vol.26. PP. 3-8. DOI: 10.15421/432201
4. Antonyuk V., Sydorova M. (2023) The concept of associative graphical interface in the workflow automation system. *System technologies*. Vol. 5 No. 148. PP. 133-140 DOI: 10.34185/1562-9945-5-148-2023-12

5. Reynolds L, McDonnell K. (2021) Prompt programming for large language models: beyond the few-shot paradigm. *Extended Abstracts of the CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* P. 1–7. URL: doi.org/10.48550/arXiv.2102.07350
6. Kojima T, Gu SS, Reid M, Matsuo Y, Iwasawa Y. (2022) Large language models are zero-shot reasoners. *Advances in Neural Information Processing Systems*. 35:22199–22213. URL: doi.org/10.48550/arXiv.2205.11916
7. Prompt Engineering Guide, URL: <https://www.promptingguide.ai/>
8. B. Chen, Z. Zhang, N. Langrené, S. Zhu (2023) Unleashing the potential of prompt engineering in Large Language Models: a comprehensive review. URL: doi.org/10.48550/arXiv.2310.14735
9. P. Liu, W. Yuan, J. Fu, Z. Jiang, H. Hayashi, G. Neubig (2021) Pre-train, Prompt, and Predict: A Systematic Survey of Prompting Methods in Natural Language Processing. URL: doi.org/10.48550/arXiv.2107.13586
10. Brown T.B, Mann B, Ryder N, Subbiah M, Kaplan J, Dhariwal P, et al. (2020) Language models Are Few-Shot Learners. *Proceedings of the 34th International Conference on Neural Information Processing Systems. NIPS'20* URL: doi.org/10.48550/arXiv.2005.14165
11. C#/.NET SDK for accessing the OpenAI APIs URL: <https://github.com/OkGoDoIt/OpenAI-API-dotnet>

Received 03.05.2024.

Accepted 06.05.2024.

### **Інтеграція та використання штучного інтелекту для автоматизованого створення макросів**

*В сучасному світі, де час стає дедалі ціннішим ресурсом, автоматизація та оптимізація робочих процесів перетворюються на ключові фактори успіху. Системи, які дозволяють автоматизувати рутинні завдання та організувати роботу, значно підвищують продуктивність та ефективність. Прикладом такої системи є “Draw & GO” [1] – ефективне та гнучке кросплатформне програмне забезпечення автоматизації робочих процесів та взаємодії з комп’ютеризованими пристроями, яке забезпечує управління на основі графічних жестів та інтеграцію з будь-якими існуючими сторонніми службами.*

*Штучний інтелект (ШІ) має великий потенціал для революційних змін у багатьох сферах. Актуальним напрямом є дослідження можливостей його застосування у системах автоматизації та організації робочих процесів, зокрема інтеграція великих мовних моделей та донавчання їх за допомогою навчання з підказками.*

*Метою цієї роботи є дослідити поєднання систем автоматизації та ШІ та їх вплив на оптимізацію робочих процесів, провести огляд існуючих рішень, визначити ключові фактори, які впливають на успішне поєднання систем автоматизації та ШІ, запропонувати технологію інтеграції та навчання великої мовної моделі для автоматизованого створення макросів у системі автоматизації процесів, реалізувати практичну апробацію запропонованої технології у системі “Draw & GO”, розробити рекомендації щодо ефективного використання систем автоматизації та ШІ для оптимізації робочих процесів.*

*Дослідження показало, що поєднання систем автоматизації та ШІ має великий потенціал для оптимізації робочих процесів та підвищення продуктивності. ШІ може допомогти автоматизувати складні завдання, покращити прийняття рішень та створити пер-*

«Системні технології» 5 (154) 2024 «System technologies»

*соналізований досвід для користувачів. Однак важливо правильно вибрати та впровадити системи автоматизації та ШІ, щоб отримати максимальну віддачу від інвестицій.*

**Антонюк Владислав Андрійович** - аспірант Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Сидорова Марина Геннадіївна** -доцент Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Vladislav Antonyuk** - PhD student Oles Honchar Dnipro National University.

**Maryna Sydorova** - Associate Professor Oles Honchar Dnipro National University.

## ПРИНЦИПИ ПОБУДОВИ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БЕЗПІЛОТНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

*Анотація.* В роботі розглядаються принципи побудови та організація системи керування безпілотних транспортних засобів. Метою роботи є розвиток принципів побудови систем керування безпілотними транспортними засобами. Вирішувані задачі: аналіз засобів збору інформації про стан та положення безпілотних транспортних засобів; розробка узагальненої архітектури системи керування безпілотними транспортними засобами. Запропоновано класифікацію засобів сенсорного сканування. Розроблено узагальнену структуру системи керування, описано її окремі функціональні підсистеми. Представлена архітектура може бути використана при створенні безпілотних транспортних засобів.

*Ключові слова:* безпілотний транспортний засіб, система керування, архітектура, сенсор, датчик, контролер.

**Постановка проблеми.** В епоху цифровізації однією з актуальних задач у транспортній галузі стає впровадження технологій безпілотного керування. Безпілотні транспортні засоби (БТЗ) – вид транспортних засобів, які пересуваються без людини – пілота на борту за допомогою спеціальної системи автономного керування. Саме наявність повноцінної системи автономного керування є відмінною рисою безпілотного транспорту від дистанційно керованих моделей. Основа концепції автономного керування полягає у вимірюванні внутрішніх та зовнішніх параметрів, їх порівнянні та створенні відповідного впливу на управління рухом БТЗ. До ключових компонентів систем керування входять датчики сприйняття, навігаційні підсистеми та алгоритми, алгоритми обробки даних, алгоритми локалізації, динамічні алгоритми планування маршрутів, комунікаційні засоби тощо. В рамках роботи пропонується аналіз принципів побудови системи керування БТЗ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найпростішим втіленням системи керування БТЗ можна уявити кінцевий цифровий автомат, бо БТЗ виконує дії виходячи від поточного стану системи та вхідних даних від датчиків. Проте, як правило, система керування БТЗ не є кінцевим автоматом у класичному сенсі теорії автоматів. Кінцеві автомати є моделями, які мають обмежену кількість станів і переходів між цими станами. Натомість у БТЗ використовуються складніші та гнучкіші методи управління, включаючи елементи штучного інтелекту, машинного навчання, адаптивні алгоритми, генетичні алгоритми та інші технології. Кінцеві автомати знаходять застосування в окремих процесах, наприклад, для автоматичного повернення БТЗ на початкову позицію при втраті зв'язку із пультом керування [1].

БТЗ поділяються на чотири основні категорії в залежності від середовища, у якому вони функціонують [2]: наземні UGV (unmanned ground vehicle), повітряні UAV (unmanned

aerial vehicle), надводні USV (unmanned surface vehicle), підводні UUV (unmanned underwater vehicle). Найбільш розвинутою є категорія UGV, яка представлена легковими та вантажними автомобілями, громадським транспортом, поїздами, різноцільовими колісними, гусеничними та крокуючими роботами. В даній роботі зосередимося саме на категорії UGV.

У доступних джерелах зустрічаються різні бачення архітектурних рішень для систем керування БТЗ [3–5]. Як правило, такі рішення залежать від конкретного набору сенсорів і датчиків.

**Мета дослідження.** Метою роботи є розвиток принципів побудови систем керування БТЗ. В роботі відповідно до мети поставлені такі задачі: аналіз засобів збору інформації про стан та положення БТЗ; розробка узагальненої архітектури системи керування БТЗ.

**Основний матеріал дослідження.** Зазвичай БТЗ забезпечені широким набором складних та функціональних сенсорів і датчиків. Розглянемо різноманітні види пристроїв, які можуть бути використані для циклічного збору даних у БТЗ (див. рис. 1), назвемо цей процес сенсорним скануванням.

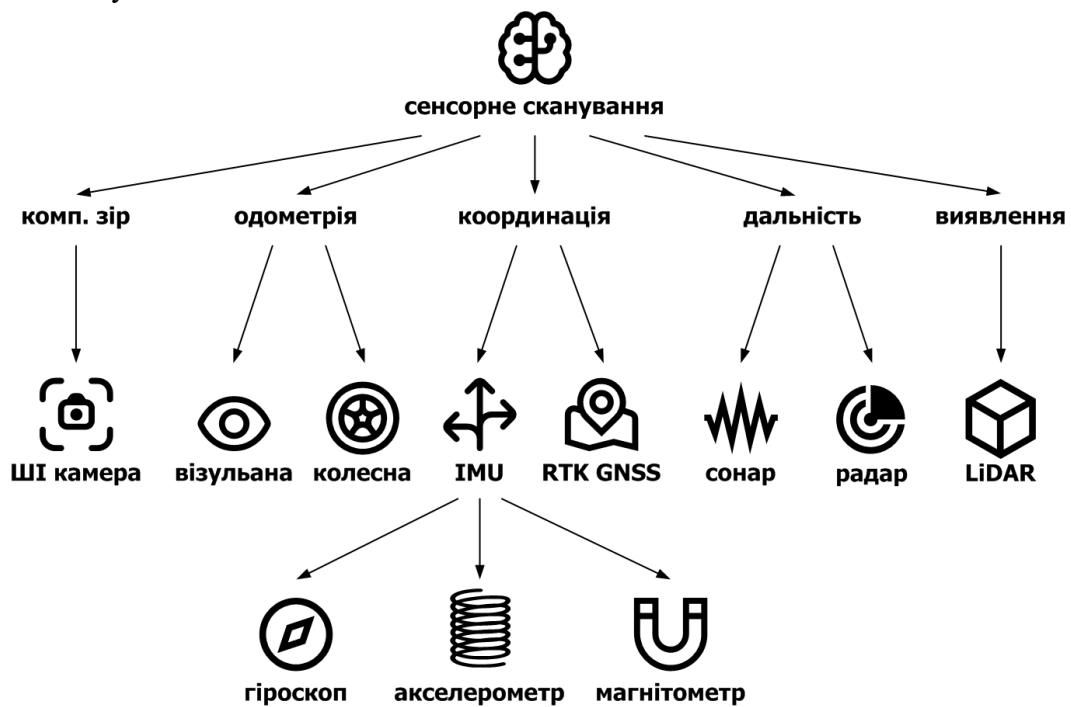


Рисунок 1 – Класифікація засобів сенсорного сканування у БТЗ

Пристрої (модулі) об'єднано в групи за функціональним призначенням, тому в одній групі можуть знаходитися датчики та сенсори кардинально різні за принципом дії.

Системи комп'ютерного зору (CV) в БТЗ використовують розумні камери для сприйняття навколишнього середовища. Камери застосовуються для виявлення, розпізнавання та відстеження об'єктів.

Колісна та візуальна одометрія – це методи вимірювання переміщення та оцінки положення БТЗ. Колісна одометрія ґрунтується на даних від приводу двигуна про обертання коліс БТЗ. Цей метод підходить тільки для колісної техніки і вразливий до помилок через фактори ковзання, зносу шин, нерівності дороги тощо. Візуальна одометрія використовує зображення

від стереокамер або всеспрямованих камер і застосовує на них CV-алгоритми. Система порівнює послідовні зображення з довкіллям і визначає, наскільки змістився об'єкт.

Координатація базується на розрахунку просторових координат для визначення місцезнаходження БТЗ. Використовується поєднання двох систем позиціонування: інерційна навігаційна система INS (inertial navigation system) та супутникова система навігації GNSS (global navigation satellite system). Супутникова система надає абсолютні координати, які використовуються як початкова точка відліку для інерційної системи. Система INS використовує дані про обертання та прискорення, отримані від інерційного вимірювального модуля IMU (inertial measurement unit) для визначення зміни відносного положення об'єкта.

Під дальністю мається на увазі визначення відстані до найближчого об'єкта. Група представлена радаром і сонаром, обидва пристрої основані на методі виявлення відбиття генерованого сигналу. Радар використовує радіохвилі, а сонар – акустику. Дані, що надаються радаром і сонаром, майже не вимагають обробки і можуть надходити безпосередньо в контролер керування, що дозволяє БТЗ екстрено реагувати при небезпеці зіткнення з об'єктом [3].

Виявлення представлено багатофункціональним інструментом – LiDAR (light identification, detection and ranging). Технологія дозволяє виміряти відстань до об'єкта шляхом опромінення його лазерним імпульсом. Лідар вимірює час, за який відбитий від об'єкта імпульс повертається назад до приймача лідару. Завдяки тому, що швидкість світла є сталою величиною, це дозволяє розрахувати відстань з дуже високою точністю. Циклічне повторення цього процесу у просторі створює цифрову 3D карту навколо БТЗ.

На основі аналізу доступних джерел [3–5] сформовано узагальнену структуру системи керування БТЗ. Представлена архітектура передбачає програмну реалізацію. Вона включає у себе сім підсистем (див. рис. 2).

З метою мінімізації структури системи керування можливе об'єднання деяких підсистем близьких за призначенням та взаємодією між собою. Так, локалізація може бути включена у підсистему сприйняття, а підсистема навігації інтегрована у блок прогнозу руху.

Модуль сприйняття відповідає за виявлення об'єктів, які знаходяться у безпосередній близькості до БТЗ. Цей модуль ставить перед собою задачі з відстеження об'єктів, розпізнавання об'єктів, а також оцінки вільного простору. Відстеження об'єктів має на меті оцінку траєкторії об'єкта, що перебуває у русі. Після ідентифікації об'єкта методами розпізнавання, система автоматично спостерігає за поведінкою об'єкта. Цей процес має місце у моніторингу найближчих транспортних засобів, що рухаються, а також інших об'єктів та перешкод, з метою запобігання зіткнень з ними.

Блок локалізації визначає місцезнаходження та орієнтацію транспортного засобу відносно місцевості у режимі реального часу, що дозволяє йому приймати високоточні рішення в динамічному середовищі. Якщо частота оновлення даних локалізації буде надто низькою, то система буде вимушена рухатися з низькою швидкістю або навіть періодично зупинятися. Якщо ж локалізація буде недостатньо точною, то це підвищує ризик зіткнення із перешкодою, яка не була вчасно виявлена. Отже, щоб забезпечити для БТЗ максимально надійну локалізацію, необхідно застосувати всі наявні ресурси сенсорного сканування.

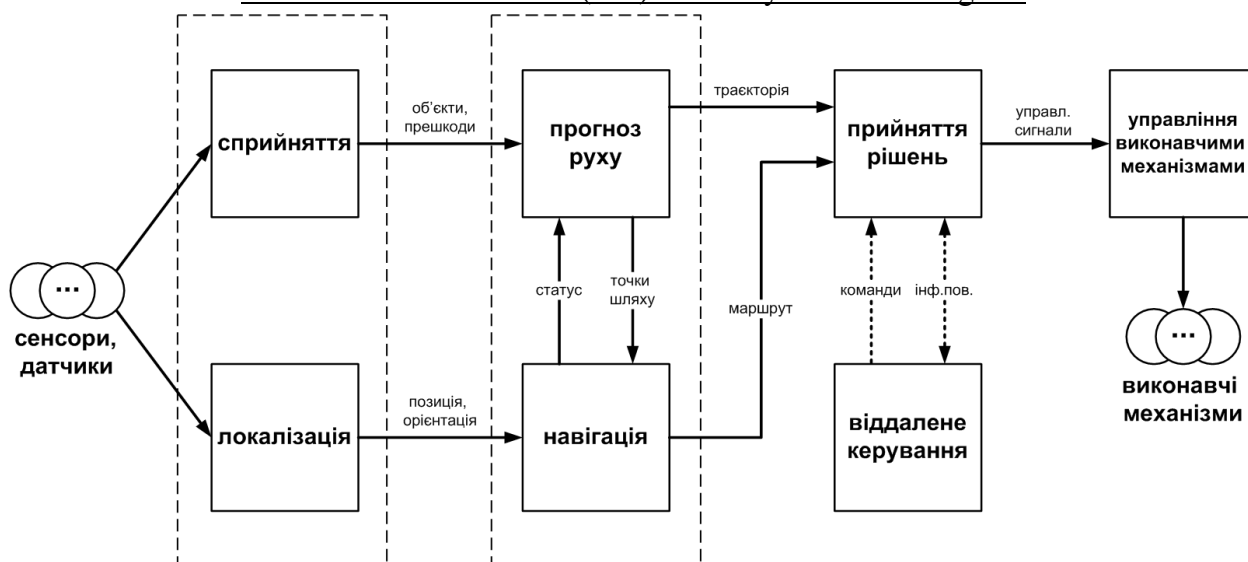


Рисунок 2 – Архітектура системи керування БТЗ

Блок прогнозу руху служить для прогнозування локального маршруту БТЗ при переміщенні з однієї точки шляху (так званий «check point») до наступної із врахуванням попередньо виявлених перешкод у блоці сприйняття. Даний процес є ітеративним, для прогнозування наступної ітерації необхідно отримати оновлений статус локалізації БТЗ у локальному просторі від підсистеми навігації. Для передбачення дій інших учасників руху використовується стохастична модель на базі наборів ймовірностей можливих положень [3].

Підсистема навігації призначена для формування глобального маршруту БТЗ, тобто від точки початку руху до пункту призначення, на основі отриманих даних від блоку локалізації (позиція та орієнтація). Порівнюються всі можливі маршрути, і на основі заданих критеріїв обирається найбільш оптимальний шлях. Це особливо важливо при можливості вибору альтернативної дороги в процесі пересування та в моменти зміни напрямку руху БТЗ. Також важливою функцією підсистеми навігації є точне визначення статусу положення БТЗ на трьохмірній HD мапі у векторному форматі, що необхідно для визначення локальної траєкторії БТЗ у підсистемі прогнозу руху.

Блок прийняття рішень приймає всі поведінкові рішення для керування підсистемою виконавчих механізмів. Поведінкові рішення можуть змінюватися або повністю надаватися підсистемою віддаленого керування, за наявності такої. Прогнозований трафік формується з врахуванням траєкторій найближчих до БТЗ учасників руху та безпосередньо траєкторії руху самого БТЗ, отриманих від блоку прогнозу руху, також використовується маршрут від блоку навігації. Система прогнозування трафіку генерує показники різного характеру, такі як час до зіткнення з об'єктом чи мінімальну відстань до нього. На основі цієї інформації активується механізм обходу перешкод, який проводить локальне перепланування шляху з метою запобігання зіткнень (перший рівень захисту).

Для забезпечення безпечного пересування БТЗ у блок прийняття рішень інтегровано другий рівень захисту під назвою система екстреного запобігання зіткнень, яка втручається у механізми керування у разі неспрацьовування модуля планування руху (вихід з ладу або виникнення непередбачуваної події). При виявленні раптової перешкоди, радар або сонар запускає екстрений механізм втручання у керування для запобігання зіткненню.

Блок віддаленого керування представляє собою комунікаційну систему зворотного зв'язку із БТЗ на основі пультавого телеуправління оператором. Оператор може застосовувати, як високорівневе, так і низькорівневе управління, або ж просто спостерігати за діями БТЗ у автоматичному режимі. Від пульта оператора відправляються команди у блок прийняття рішень, обидва блоки обмінюються інформаційними повідомленнями про статус БТЗ та виконання команд. Дана підсистема є не обов'язковою, якщо БТЗ є повністю автономним.

Підсистема управління виконавчими механізмами виконує безпосереднє управління електромеханічними органами БТЗ на основі отриманих управляючих сигналів від модуля прийняття рішень.

Основними апаратними компонентами системи є контролери високого та низького рівня (див. рис. 3). Контролер високого рівня призначений для прийому відео потоку і реалізації комп'ютерного зору. Для цієї задачі підійде потужний міні-комп'ютер (Raspberry Pi, Orange Pi, Odroid тощо). Контролером низького рівня, як правило, виступає мікроконтролерна платформа (Arduino, ESP32, STM32 тощо), призначена для роботизованого керування виконавчими механізмами.

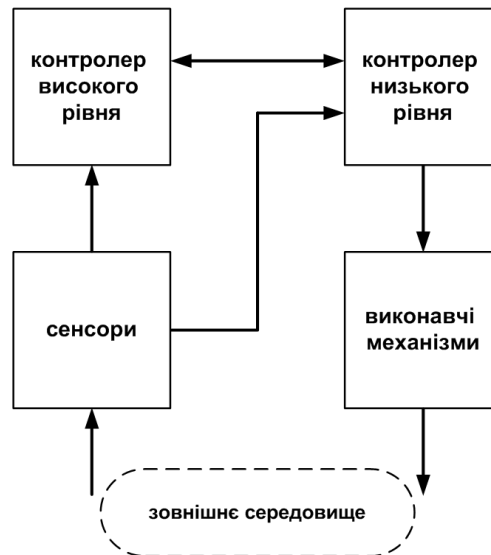


Рисунок 3 – Основні апаратні модулі для керування БТЗ

**Висновки.** В роботі розглянуті принципи побудови та організація систем керування БТЗ. Запропоновано класифікацію засобів сенсорного сканування у БТЗ. За результатами аналізу доступних джерел розроблено узагальнену структуру системи керування БТЗ, описано її окремі функціональні підсистеми та організацію обміну даними між ними. Визначено основні апаратні компоненти систем керування. Представлена архітектура може бути використана при створенні БТЗ.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. de Araújo V., Paula G. S. Almeida A., T. Miranda C., de Barros Vidal F. A Parallel Hierarchical Finite State Machine Approach to UAV Control for Search and Rescue Tasks. *Proceedings of the 11th International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics - Volume 2: SciTePress*, p. 410-415. URL: <https://doi.org/10.5220/0005121104100415>

2. Balestrieri E., Daponte P., De Vito L., Lamonaca F.. Sensors and Measurements for Unmanned Systems: An Overview. *Sensors*. 2021; 21(4): 1518. URL: <https://doi.org/10.3390/s21041518>
3. Creating Autonomous Vehicle Systems, Second Edition / Shaoshan Liu, Liyun Li, Jie Tang, Shuang Wu, Jean-Luc Gaudiot. Morgan & Claypool Publishers, 2020. 216 p.
4. Lazna T, Gabrlik P, Jilek T, Zalud L. Cooperation between an unmanned aerial vehicle and an unmanned ground vehicle in highly accurate localization of gamma radiation hotspots. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2018. vol. 15(1). URL: <https://doi.org/10.1177/1729881417750787>
5. System for multi robotic exploration of underground environments CTU-CRAS-NORLAB in the DARPA subterranean challenge / T. Rouček and oth. *Field Robotics*. 2022. vol. 2. p.1779–1818. URL: <https://doi.org/10.55417/fr.2022055>

Received 03.05.2024.

Accepted 06.05.2024

### ***Principles of construction of control systems for unmanned vehicles***

*The work considers the principles of construction and organization of the control system of unmanned vehicles. Unmanned vehicles (UAVs) are a type of vehicles that move without a human pilot on board using a special autonomous control system. The key components of control systems include perception sensors, navigation subsystems and algorithms, data processing algorithms, localization algorithms, dynamic route planning algorithms, communication tools, etc. In the available sources, there are different visions of architectural solutions for UAV control systems. As a rule, such solutions depend on a specific set of sensors.*

*The purpose of the work is to develop the principles of building control systems for unmanned vehicles. Solved tasks: analysis of means of collecting information about the state and position of unmanned vehicles; development of a generalized architecture of the control system of unmanned vehicles.*

*A classification of sensor scanning tools is proposed. The following groups of sensor scanning modules have been defined: computer vision, odometry, coordination, range, detection. The generalized structure of the control system is developed, its separate functional subsystems are described. The presented architecture involves software implementation and includes seven subsystems: perception, localization, motion prediction, navigation, decision-making, remote control, control of executive mechanisms. In order to minimize the structure of the control system, it is possible to combine some subsystems that are similar in purpose and interaction with each other. So, localization can be included in the perception subsystem, and the navigation subsystem is integrated into the motion prediction unit. The main hardware components of the system are high-level and low-level controllers. The presented architecture can be used in the creation of unmanned vehicles.*

*Keywords: unmanned vehicle, control system, architecture, sensor, detector, controller.*

**Остапєць Ярослав Дєнісович** – магістр, кафедра «Електронні обчислювальні машини» Українського державного університету науки і технологій, ORCID: 0000-0003-1976-5188

**Ostapets Yaroslav** – master, «Electronic computers» department of Ukrainian State University of Science and Technologies, ORCID: 0000-0003-1976-5188

## АНАЛІЗ ТА ПІДГОТОВКА ДАНИХ ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ПЛАЗМОХІМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ НАНОСИСТЕМ

*Анотація. Одним із нових напрямів промислової хімічної технології є плазмохімічна. Незважаючи на значні експериментальні та теоретичні дослідження, фізико-хімічні процеси є складними і не повністю вивченими для масштабування та контролю за ними в серійному виробництві. В низькотемпературній плазмі хімічні процеси, закономірності реакцій та основи плазмохімічної технології потребують комп'ютерного моделювання. Експериментальні дані натурних експериментів потребують додаткового аналізу і підготовки щодо подальшого їх застосування та побудови адекватних імітаційних моделей плазмохімічних процесів для розробки наносистем. У ході попереднього експерименту, який фактично включає два етапи, було оглянуто вхідні та вихідні змінні прикладного завдання. Розроблено програмний інструментарій для проведення аналізу експериментальних даних, який дозволяє зібрати статистичну інформацію, візуалізувати деякі процеси. Розглянуто та реалізовано програмно підходи побудови аналітичних та імітаційних моделей плазмохімічних процесів отримання наносистем.*

*Оглянуто два можливих напрямки щодо підходів побудови гомоморфних моделей: класичні та з використанням штучного інтелекту. Запропоновано розглянути лінійні та нелінійні регресійні моделі. В якості першого типу моделей пропонується множинна регресія та методи, які використовують регуляризацію. Альтернативою першому підходу є побудова нелінійних моделей, які базуються на методі опорних векторів. Розглянуто векторну та мультивекторну регресії. Багатовимірні регресії спрямовані на вивчення та побудову відображення багатовимірного вхідного простору ознак у багатовимірний вихідний простір. Проведено аналіз отриманих чисельних результатів та запропоновано використовувати для комп'ютерного моделювання нелінійні моделі плазмохімічних процесів для отримання наносистем, зокрема: мультивекторну регресію.*

*Ключові слова: статистичний аналіз даних, регресійні моделі, моделювання плазмохімічних процесів отримання наносистем.*

**Постановка проблеми.** Процес, у якому наноматеріали синтезуються або обробляються за допомогою плазми може відбуватися у різних установках та включати різноманітні етапи, такі як: підготовку системи, яка може включати очищення поверхні матеріалів, введення реакційних газів та інших реагентів, підготовку підкладок тощо; створення плазми, що може бути досягнуто за допомогою методів використання радіочастотної або мікрохвильової енергії для іонізації газів; ініціація реакції, яка розпочинається між реагентами та відбувається формування наночастинок або інших наноструктур; ріст та агломерація включають контроль

цих процесів для отримання бажаного розміру та форми наночастинок. Після завершення реакції, наносистема може бути видалена з реакційної камери та піддана додатковій обробці, такий як очищення або функціоналізація.

Плазмохімічні процеси можуть бути використані для отримання різноманітних наноматеріалів, таких як квантові точки, нанотрубки, нанокристали тощо. Можуть використовуватися для обробки та модифікації вже існуючих наноматеріалів з метою покращення їхніх властивостей. Очевидно, що плазмохімічні процеси є складними, ресурсо- та матеріалоємними [1-3].

Наносистеми різного складу та організації в даний час широко досліджуються в ході вдосконалення методів синтезу відповідно до вимог сучасності з можливістю обов'язкового прогнозування та управління функціональними властивостями для подальшого застосування в різних сферах.

**Мета дослідження.** Провести аналіз експериментальних даних та представити методи їх обробки при комп'ютерному моделюванні плазмохімічних процесів отримання наносистем. Запропонувати підходи щодо побудови математичних моделей вказаного процесу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З точки зору наноіндустрії напрямком, який відповідає сучасним вимогам, є плазморідинові методи синтезу різних конфігурацій, який, завдяки можливості різних конфігурацій і технологічних параметрів, дозволяє синтезувати наносистеми різного складу і структури. Незважаючи на значні експериментальні та теоретичні дослідження, фізико-хімічні процеси є складними і не повністю вивченими для масштабування та контролю за ними в серійному виробництві. Тому актуальним є питання комп'ютерного моделювання плазмохімічного синтезу.

Побудова адекватних імітаційних моделей плазмохімічних процесів наносистем та комп'ютерне моделювання з ними дозволяють вирішувати прикладні задачі в даній предметній області. Моделювання процесів в рідині під впливом плазми складне і вимагає розуміння комплексного впливу процесів і рідин на межі розподілу фаз «рідина-плазма».

Очевидно, що для побудови моделей можна застосовувати як класичні підходи, так і підходи з використанням елементів штучного інтелекту [4, 5]. Якщо приділити увагу традиційним методам, то тут можна виділити два напрями: побудова аналітичних або імітаційних моделей [4, 6]. Технології обчислювального інтелекту надають можливість використовувати неklasичні підходи щодо побудови математичних моделей хімічних процесів [6]. Нейромережеві технології, наприклад, дозволяють створювати математичні імітаційні моделі різних процесів [6-8].

Автори вважають за доцільне провести спочатку аналіз вхідних даних, які застосовуються при побудові аналітичних або імітаційних моделей при використанні різних технологій, а потім перейти до розгляду безпосередньої побудови моделей плазмохімічного процесу отримання наносистем.

**Викладення основного матеріалу.** Маємо результати експериментальних дослідів з отримання наночасток із розчину нітрату срібла ( $\text{AgNO}_3$ ), одержаний розчин в подальшому може використовуватись в різних галузях господарської діяльності.

Симуляція плазмохімічних процесів, у тому числі отримання наносистем, потребує попереднього аналізу експериментальних даних та подальшого їх використання, наприклад,

для побудови моделей та роботи з ними. Натурні експерименти з отримання наносистем у фізико-хімічних процесах проводились неодноразово, тому їх можна використовувати як множину даних (вхідних та вихідних).

В якості вхідних параметрів розглядаються:

- концентрація прекурсора  $\text{AgNO}_3$  ( $x_1$ , г/л);
- співвідношення прекурсора та стабілізатора ( $x_2$ , г/л);
- тривалість обробки ( $x_3$ , с. та  $x_4$ , ум. од.);
- довжина хвилі ( $x_5$ , нм та  $x_6$ , в долях);
- вид стабілізатора ( $x_7$ );
- сила струму ( $x_8$ , мВ та  $x_9$ , в долях);
- тиск газової фази ( $x_{10}$ , мПа);
- напруження ( $x_{11}$ , В).

Вихідними параметрами є:

- розмір отриманих наночасток ( $y_1$ , нм);
- індекс полідисперсності (IPD) ( $y_2$ );
- Z-потенціал ( $y_3$ ).

Інтервали варіювання усіх змінних та їх експериментальні значення є відомими, але залежність між ними невідома. На етапах попереднього експерименту при аналізі даних можна не враховувати деякі змінні (рис. 1а) тому, що вони безпосередньо впливають на технологічний процес, але вони є незмінними на протязі проведення натурального експерименту та, як наслідок, їх можна записати як константи при дослідженні вхідних даних. Таким чином, пропонується з одинадцяти вхідних змінних залишити значно меншу кількість. Наприклад, незмінними є: тиск газової фази або напруження. Стосовно змінної сила струму, то значення, які вона може приймати – це є або 120 мВ, або 220 мВ. Тому можна рекомендувати розглядати два типи моделей для вказаних відповідних значень. Очевидно, що наведені параметри впливають на сам плазмохімічний процес отримання наночасток, але для аналізу даних та для побудови моделей ці змінні є константами та не несуть інформативності, тому їх пропонується не враховувати при аналізі даних [4].

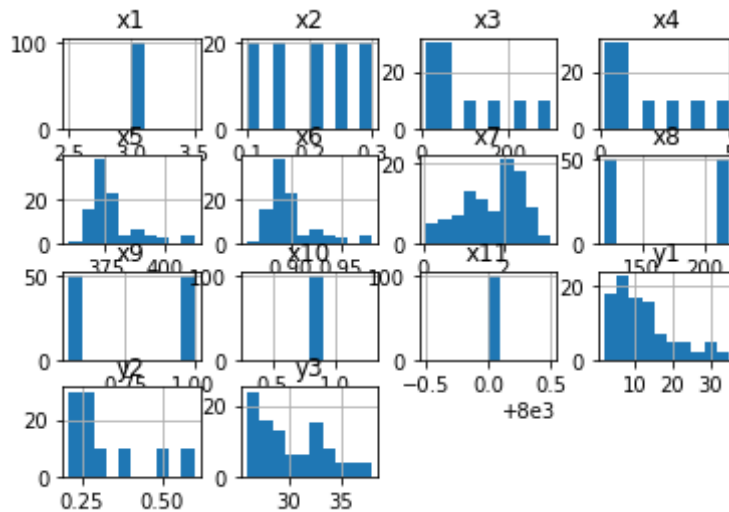
Таким чином, замість одинадцяти змінних маємо чотири вимірний простір  $X^4$  вхідних незалежних змінних, а на виході тривимірний  $Y^3$  залежних параметрів. Завдання полягає у знаходженні такої моделі/моделей, які дозволяють виконати відображення простору  $X^4$  на простір  $Y^3$ .

Оскільки, як було зазначено вище, що в якості вхідних змінних залишилися наступні змінні (рис. 1б), то наведемо інтервали їх варіювання:

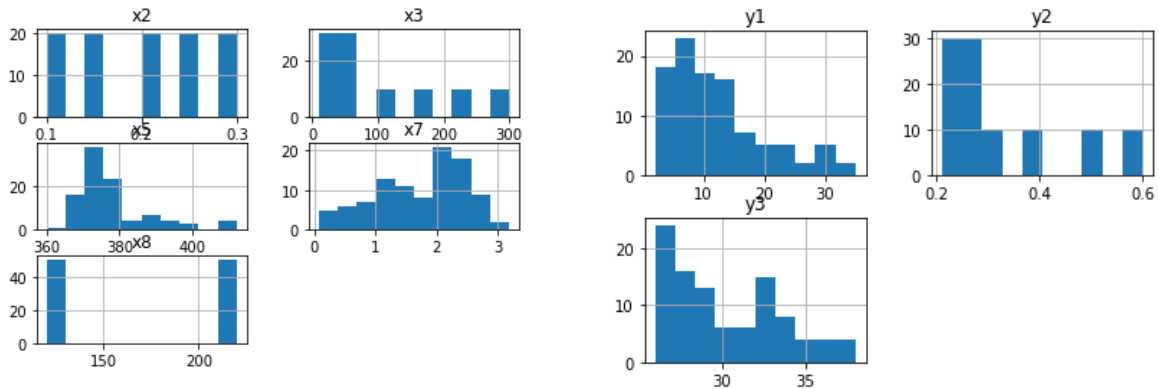
- співвідношення прекурсора та стабілізатора ( $x_2 \in [0,10; 0,30]$ );
- тривалість обробки ( $x_3 \in [10; 300]$  с.);
- довжина хвилі ( $x_5 \in [360; 412]$  нм);
- вид стабілізатора ( $x_7 \in [0,86; 0,98]$ ).

Стосовно вихідних даних (рис. 1в), то вони є незмінними: розмір частинок ( $y_1$ ), полідисперсність ( $y_2$ ), дзета потенціал ( $y_3$ ).

У роботі розроблено програмний інструментарій, який дозволяє працювати з експериментальними даними та будувати аналітичні моделі. Для сформованого датасету плазмохімічного процесу отримання наносистем є можливість одержати деякі статистичні характеристики, побудувати гістограми усіх залежних та незалежних змінних (рис. 1), побудувати теплову карту (кореляційну матрицю), діаграми для змінних квантль-квантиль, тощо.



а) Початкові незалежні та залежні змінні



б) Вхідні незалежні змінні

в) Вихідні залежні змінні

Рисунок 1 – Вхідні та вихідні експериментальні дані

З метою аналізу наявних експериментальних даних та побудови можливих моделей для використання у плазмохімічних процесах отримання наносистем було програмно реалізовано та побудовано різні математичні моделі (табл. 1). Слід зауважити, що незважаючи на простоту побудови, наприклад, лінійних регресійних моделей, автори вважають за доцільне навести і їх, та провести аналіз отриманих чисельних результатів.

## Результати чисельних експериментів

Побудована модель	Похибка моделі на тестових даних	Коефіцієнт детермінації, $R^2$
Лінійні моделі		
Множинна регресія (Linear Regression)	1,1045 (MSE) 0,7090 (MAE)	0,889
Ласо регресія (Lasso Regression)	4,7621 (RMSE)	0,518
Гребнева (Ridge Regression)	3,1638 (RMSE)	0,755
Еластична регресія (ElasticNet Regression)	4,7719 (RMSE)	0,509
Нелінійні моделі		
Поліноміальна першого порядку	2,0619 (MSE)	0,885
Поліноміальна третього порядку	0,4029 (MSE)	0,972
Поліноміальна п'ятого порядку	0,0501 (MSE)	0,997
Векторна регресія (Support Vector Regression - SVR)	16,9769 (MSE) 00,0033 (MSE) 11,15082 (MSE)	0,733 0,798 0,700
Мульти векторна регресія (MultiOutput SVR)	01,3505 (MSE)	0,904

Вибір критерію якості роботи моделі характеризується наступними метриками: квадратний корінь із середньоквадратичної похибки (Root Mean Squared Error – RMSE), середня абсолютна похибка (Mean Absolute Error – MAE) та середня квадратична похибка (Mean Squared Error – MSE), які є відомими та не потребують додаткових пояснень [9].

Проведемо аналіз отриманих результатів чисельних експериментів. Якщо розглядати найпростіші моделі, то, на перший погляд, може здатися, що множинна лінійна регресія (Linear Regression) має кращий результат та більш-менш непоганий має гребнева регресія (Ridge Regression), коефіцієнти детермінації яких відповідно є 0,889 та 0,755.

У таблиці не наведені безпосередньо отримані коефіцієнти самих моделей, але при аналізі їх маємо, що у моделях гребневої та еластичної регресії у всіх моделях для змінних  $x_2$  та  $x_7$  коефіцієнти дорівнюють нулю. Останнє може свідчити про те, що ці змінні можна відкинути, але було проведено попередній аналіз для побудови гомоморфних математичних моделей та залишено лише ті змінні, які не можуть не враховуватись.

Додатковий аналіз змінних  $x_5$  та  $x_7$  на VIF (variance inflation factor) або коефіцієнт інфляції дисперсії показує, що саме ці змінні мають найбільшу міру мультиколінеарності між змінними у моделі регресії. Таким чином, може бути ситуація, коли одна змінна може бути лінійно залежною від інших, має занадто велике значення VIF, і, як наслідок, це може призвести до нестабільності оцінок коефіцієнтів у моделі та до зміни їх інтерпретації.

Слід зауважити, що для побудови, наприклад, найпростішої лінійної моделі необхідна перевірка та виконання достатньо нетривіальних умов, у тому числі: відсутність мультиколінеарності; нормальний розподіл похибок; гомоскедастичність похибок; відсутність викидів (аномалій) тощо [10-13].

Програмна реалізація дозволяє реалізувати перевірку вказаних вимог. Наприклад, робота з похибками на тестовому наборі для усіх трьох вихідних змінних (голубий для  $y_1$ , рожевий –  $y_2$ , зелений –  $y_3$ ) наведено на рисунку 2 в якості графіку розподілу похибок.

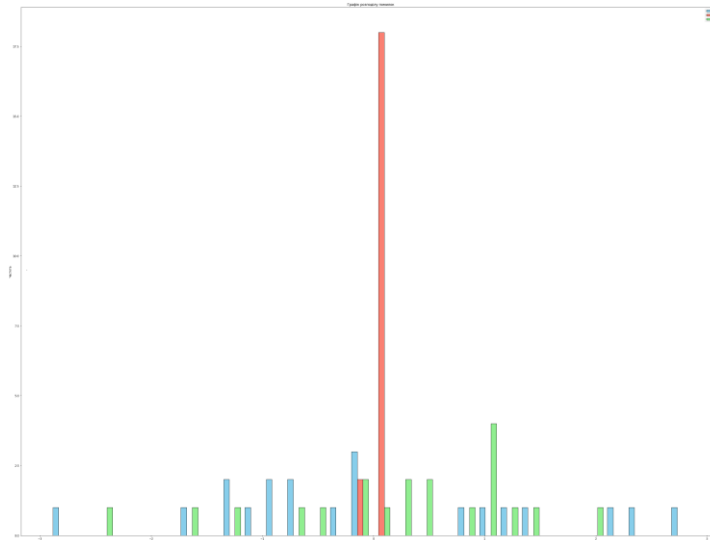


Рисунок 2 – Графік розподілу похибок

Як відомо, похибки моделі повинні мати нормальний розподіл тому, що це важливо для точних статистичних висновків та довірчих інтервалів для параметрів. Похибки повинні бути однорідними по всьому діапазону значень ознак. Інакше, якщо дисперсія похибок неоднакова, то може виникнути проблема гетероскедастичності.

Аналіз отриманих результатів (рис. 2) може свідчити, що усі розподіли похибок по залежним змінним не схожі та не мають нормального закону розподілу. Особливу увагу привертає те, що розподіл для полідисперсності  $y_2$  має аномально великі значення похибок. Очевидно, що це може вказувати що модель: 1) не враховує всіх факторів, які впливають на змінну  $y_2$ , або може бути сигналом про те, що дані містять велику кількість шуму та/або випадкових варіацій; 2) може вказувати на те, що сама змінна  $y_2$  має велику дисперсію або широкий діапазон значень; 3) може бути результатом непередбачуваних несподіваних аспектів датасету.

Стосовно експериментальних даних, то початкову підготовку та їх обробку було зроблено ще на етапах попереднього експерименту, тобто питання шуму та варіацій можна зняти. Якщо подивитися на діапазон зміни цієї змінної полідисперсності, то не можна вважати його широким,  $[0,21; 0,60]$ , крім того дисперсія та стандартне відхилення дорівнюють відповідно 0,016 та 0,13.

Для підтвердження або спростування факту, що закон розподілу похибок нормальний або ні, пропонується додатково перевірити за допомогою квантилів похибок (по вертикалі) (рис. 3). Представлено квантиль графік, який допомагає порівняти розподіл похибок з теоретичним нормальним (або будь-яким іншим) розподілом (по горизонталі). Аналіз отриманих результатів свідчить, що всі точки на графіку не лежать приблизно на прямій, це означає, що розподіл похибок не відповідає теоретичному розподілу.

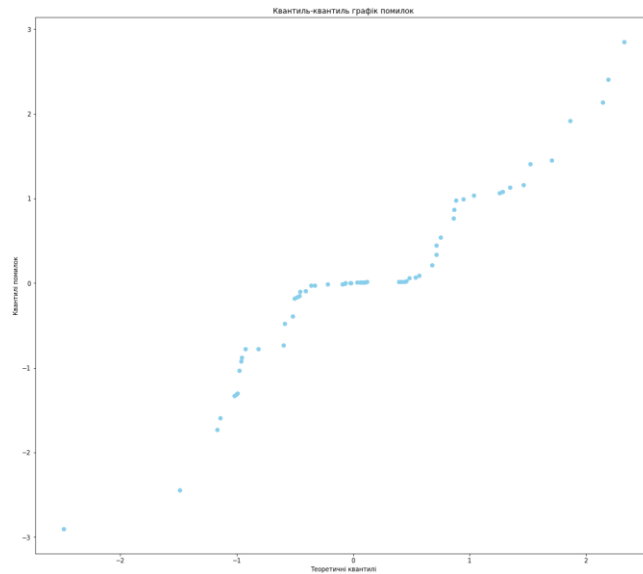


Рисунок 3 – Квантилі похибок для лінійної регресії

В будь-якому випадку, звісно, важливо додатково проаналізувати дані для розуміння причин великих значень в змінних або похибках. Якщо говорити про проведення додаткових натурних експериментів, то цей процес можливий, але матеріально затратний.

Очевидно, що використання множинної лінійної регресії є проблематичним, тому було зроблено спробу використання інших варіантів з використанням регуляризації, таких як: ласо (Lasso Regression - Least Absolute Shrinkage and Selection Operator Regression), гребнева (Ridge Regression), комбінована (Lasso та Ridge) регресії.

За для запобігання та вирішення проблеми перенавчання було використано Lasso Regression, але результати навчання, які мають коефіцієнт детермінації рівним 0,518, є суттєво недостатніми для її використання. Крім того, запропонована модель містить ще більше нулів в якості отриманих коефіцієнтів моделі, що теж свідчить не на її користь.

Спроба використання комбінованої моделі ElasticNet Regression, яка використовує типи штрафів для коефіцієнтів моделі, з метою зменшення перенавчання та покращення узагальнюючих можливостей моделі, теж показала не самий кращий результат. Відповідно до отриманих та очікуваних результатів, стосовно використання лінійних моделей, автори вважають за доцільне звернутися до нелінійних моделей.

Друга частина таблиці 1 містить нелінійні моделі, які автори вважають за потрібне прокоментувати. Якщо розглядати поліноміальні моделі, то в принципі результати можна вважати такими, що можуть бути використані у подальшому моделюванні. Єдине зауваження, яке може бути висунуте для таких моделей, то яким чином обрати степінь полінома при застосуванні поліноміальних моделей. Очевидно, що це питання може бути вирішено хіміками-користувачами експериментальним шляхом. В цілому цей блок моделей показує достатньо непогану здатність до прогнозування, але отримані похибки мають бути кращими.

Останні два рядки таблиці 1 представляють використання варіантів методу опорних векторів (Support vector machine – SVM): Support Vector Regression [14] та MultiOutput SVR [15].

Запропоновані підходи дозволяють будувати нелінійні регресійні моделі для прогнозування неперервних числових значень з урахуванням умови максимізації ширини регресійного коридору. SVR дозволяє деякий функціональний шум, оскільки не всі точки можуть точно потрапляти в регресійний коридор через нерегулярність в даних. Знаходження оптимального регресійного коридору у просторі є можливим за рахунок використання ядерних функцій. Оскільки у роботі розглядається невеликий датасет та має місце нелінійна залежність між вхідними та вихідними змінними, то використання Support Vector Regression є доцільним. Звісно, що необхідно звертати увагу на чутливість до вибору параметрів (тип ядра, степінь полінома та параметри регуляризації) моделі SVR.

Як відомо, мульти векторна регресія (MultiOutput SVR) є методом машинного навчання, який розширює підхід SVR на випадок, коли є багатовимірні вихідні дані. MultiOutput SVR надає змогу моделі адаптуватися до складних залежностей між вхідними та вихідними змінними в багатовимірному просторі та використовується в задачах регресії, де потрібно передбачити кілька вихідних змінних одночасно.

Результати застосування математичної моделі, побудованої з використанням поліноміальної та мульти векторної регресії, можна вважати найкращими серед запропонованих, якщо враховувати отримані для останньої моделі метрики: середньо квадратична похибка  $MSE = 01,3505$  та коефіцієнт детермінації  $R^2 = 0,904$ .

Порівняльний аналіз моделей у двох останніх рядках таблиці 1 свідчить, що використання декількох окремих моделей SVR все ж таки очікувано видає гірші результати, аніж використання однієї моделі MultiOutputSVR. Остання модель ефективніше використовує кореляцію між цільовими змінними та враховує її для прогнозування. Як наслідок, це призводить до більш точних прогнозів та кращої узагальнюючої здібності моделі. Єдине, що слід зауважити, що при використанні цієї моделі може все одно виникнути необхідність її налаштування. Наприклад, підбір гіперпараметрів моделі. Зауважимо, що останні результати було отримано для параметру регуляризації  $C = 4,5$  та ширини коридору, який дорівнює  $\epsilon = 0,001$ .

**Висновки.** Пропонується робота з даними, які отримані експериментально при проведенні плазмохімічних процесів для отримання наносистем. Виконується аналіз цих даних та розглядаються можливості побудови математичних моделей для подальшого їх використання у комп'ютерному моделюванні таких процесів.

Оглянуто найпростіші моделі та зроблено аналіз щодо їх використання. Запропоновано застосування нелінійних моделей, зокрема, мульти векторну регресію (MultiOutput SVR).

Результати чисельних експериментів дозволяють стверджувати, що такий підхід може непогано працювати з даними, які мають складну структуру та неоднорідний розподіл. Застосування методу дозволяє моделювати складні нелінійні залежності між вхідними та вихідними змінними за допомогою використання ядерних функцій та має здатність ефективно працювати з невеликими вибірками даних, оскільки використовує опорні вектори для моделювання регресійного коридору.

ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Zhang T., Song Y.-J., Zhang X.-Y., and Wu J.-Y. Synthesis of silver nanostructures by multistep methods. *Sensors*, 2014. vol. 14, no. 4, pp. 5860–5889.
2. Skiba M. I., Vorobyova V. I. Synthesis of silver nanoparticles using orange peel extract prepared by plasmochemical extraction method and degradation of methylene blue under solar irradiation. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2019. P.1-8.
3. Skiba M., Vorobyova V., Pivovarov A., Makarshenko N. Green synthesis of silver nanoparticles in the presence of polysaccharide: optimization and characterization. *Journal of Nanomaterials*, 2019. P.1-10.
4. Makarchenko V., Korotka L., Skiba M. Neural network modeling of plasma-chemical processes of obtaining nanosystems. *International scientific and technical conference Information Technologies in Metallurgy and Machine building (ITMM 2023)*, 2023. p. 99-101 (DOI: 10.34185/1991-7848.itmm.2023.01.024)
5. Verma S.; Chugh S.; Ghosh S.; Rahman B.M. Artificial Neural Network Modelling for Optimizing the Optical Parameters of Plasmonic Paired Nanostructures. *Nanomaterials*, 2022. 12, 170. <https://doi.org/10.3390/nano12010170>
6. Зеленцов Д.Г., Коротка Л.І. Технології обчислювального інтелекту в задачах моделювання складних систем: монографія. Баланс-Клуб, Дніпро. 2018. 178 с.
7. Коротка Л.І. Функціональна підсистема раціонального вибору архітектури нейронної мереж. *Вісник Херсонського національного технічного університету*, 2017. 3(62), Том I. (Фундаментальні науки). С. 55-59.
8. Коротка Л.І. Аналіз нейромережових моделей в задачах оптимізації технології енергоконденсованих систем. *Математичне моделювання*, 2018. № 1 (38). С. 69-76.
9. Жерон Орельєн Прикладне машинне навчання за допомогою Scikit-Learn та TensorFlow: концепції, інструменти та техніки для створення інтелектуальних систем. Пер. з англ. - СпБ.: ООО «Альфа-книга», 2018. - 688 с.: іл.
10. Gareth James, Daniela Witten, Trevor Hastie and Robert Tibshirani. An Introduction to Statistical Learning. *Springer Texts in Statistics*, 2013. 426 p.
11. Muhammad Raza, Mumtaz Ahmed, Shahid Razzaque, Hafsa Hina. Testing for Heteroskedasticity in The Presence of Outliers. *Journal of Education and Social Studies*, 2023. 4(2):313-329. (DOI: 10.52223/jess.2023.4209)
12. Mike X Cohen. Practical Linear Algebra for Data Science: From Core Concepts to Applications Using Python. *O'Reilly Media*, 2022. 326 p.
13. Roderick J.A. Little та Donald B. Rubin. Statistical Analysis with Missing Data. *Wiley. John Wiley & Sons, LTD*, 2019. 462 p.
14. Alex J. Smola and Bernhard Schölkopf. A Tutorial on Support Vector Regression. *Statistics and Computing*, 2004. No.14: 199–222.
15. Shuo Xu, Xin An, Xiaodong Qiao, Lijun Zhu, Lin Li. Multi-output least-squares support vector regression machines. *Pattern Recognition Letters*, 2013. Volume 34, Issue 9. P. 1078-1084.

Received 10.05.2024.

Accepted 13.05.2024.

***Analysis and preparation of data during modeling  
of plasma-chemical processes of obtaining nanosystems***

*One of the new directions of industrial chemical technology is plasma chemical. Despite significant experimental and theoretical research, physicochemical processes are complex and not fully understood for scaling and control in mass production. In low-temperature plasma, chemical processes, regularities of reactions, and the basics of plasma chemical technology require computer modeling. The experimental data of natural experiments require additional analysis and preparation for their further application and the construction of adequate simulation models of plasma-chemical processes for the development of nanosystems. In the course of the preliminary experiment, which includes two stages, the input and output variables of the application task were examined. A software toolkit has been developed for the analysis of experimental data, which allows collecting statistical information and visualizing some processes. The software approaches to building analytical and simulation models of plasma-chemical processes of obtaining nanosystems were considered and implemented.*

*Two possible approaches to the construction of homomorphic models are reviewed: classical and with the use of artificial intelligence. Without limiting judgment, linear and non-linear regression models were reviewed. The first type of model is multiple regression and methods that use regularization. As an alternative, the construction of nonlinear models based on the method of support vectors is proposed. Vector and multi-vector regressions are considered. Multidimensional regression is aimed at studying and constructing a mapping of a multidimensional input feature space into a multidimensional output space. The obtained numerical results were analyzed and it was proposed to use nonlinear models of plasma-chemical processes for obtaining nanosystems for computer simulation, in particular: multi-vector regression.*

*Keywords: statistical data analysis, regression models, simulation of plasmatic processes of obtaining nanosystems.*

**Макарченко Віктор Сергійович** - аспірант кафедри інформаційних систем за спеціальністю «Комп'ютерні науки», Український університет науки і технологій.

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

**Makarchenko Viktor Serhiyovych** - Postgraduate at the Department of Information Systems, with a speciality «Computer Science», Ukrainian State University of Science and Technology.

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

## ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ТЕКСТОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ З TELEGRAM

*Анотація.* У сучасному світі інформаційних технологій розвиток інтернету призвів до стрімкого зростання кількості інформації. Відповідно, сьогодні особливої актуальності набувають застосунки, що здатні полегшити роботу з цією інформацією. Особливу увагу в цьому контексті заслужують системи агрегації та класифікації текстової інформації, які використовуються для обробки даних з різноманітних джерел, зокрема з телеграм-каналів. Найбільш активною сферою досліджень є використання моделей машинного навчання для аналізу тексту, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності обробки даних. Запропоновано програмне забезпечення – вебзастосунок для аналізу текстової інформації з Telegram. Можливі сфери застосування розробленого застосунку охоплюють широкий спектр галузей – від цифрового маркетингу та соціальних досліджень до аналізу новин та наукових досліджень.

*Ключові слова:* аналіз текстової інформації, моделі машинного навчання для аналізу тексту, BERT, класифікація.

Сучасні методи обробки текстових даних, зокрема машинне навчання, дозволяє нам визначати емоційне забарвлення тексту, класифікувати його за певними категоріями, виділяти основні теми та інші характеристики. Провідні наукові установи та ІТ-компанії активно досліджують цю галузь, розробляючи алгоритми для ефективної обробки та аналізу текстових даних. Зокрема, важливу роль відіграють роботи в галузі обробки природної мови (NLP) [1], що включають розробку алгоритмів для розуміння, інтерпретації та генерації людської мови машинами.

Дана робота зосереджена на створенні вебзастосунку, що спрямований на агрегацію та класифікацію текстової інформації з телеграм-каналів. Подібні застосунки відіграють ключову роль у структуруванні та систематизації текстових даних, що спрощує їх аналіз. У світлі стрімкого збільшення обсягів інформації в мережі Інтернет, таке програмне забезпечення виявляється актуальним як для сьогоднішнього, так і у найближчому майбутньому.

**Метою розробки** є створення інструменту, що надасть користувачам можливість ефективно класифікувати, аналізувати та візуалізувати великі обсяги текстової інформації.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В контексті обробки текстових даних варто пам'ятати, що текстова інформація в цифровому форматі – це не тільки електронні книги чи статті, але й пости в соціальних мережах, повідомлення в месенджерах та блоги. В наш час соціальні мережі та месенджери почали відігравати ключову роль в інформуванні суспільст-

ва та формуванні думок мільйонів українців. Так, за даними Київського міжнародного інституту соціології найпопулярніше джерело інформації для громадян нашої країни є телеграм-канали [2].

Популярність та актуальність задач агрегації та аналізу текстової інформації призвела до появи та розвитку великої кількості програмних продуктів у даній сфері. Однак, розгляд існуючих застосунків виявляє ряд проблем, які суттєво обмежують їхній потенціал та ефективність використання в академічних та дослідницьких цілях. Основні моменти, на яких буде побудоване порівняння, це чи існує можливість адаптувати роботу застосунку під конкретну задачу користувача, чи доступні користувачу інструменти для проведення досліджень у сфері соціальних наук, наявність алгоритмічної прозорості та доступ до вихідного коду застосунків для спільноти. Окрім цього ми звернемо увагу на доступний функціонал: можливість експорту сирих даних, що були використанні у побудові графіків, що є корисним для будь-якого дослідника, можливість побудови «хмари слів».

Таблиця 1

Порівняння з аналогами (Kin-TXT – розроблене)

Функціонал	Kin-TXT	Revuze	Talk Walker	Moneky Learn	Пояснення
Експорт сирих даних	+	-	-	+	Можливість зберегти сирі дані для інших досліджень.
Інтеграція користувацьких класичних моделей машинного навчання	+	-	-	+	Дозволяє використовувати користувацькі моделі, засновані на традиційних алгоритмах ML.
Інтеграція користувацьких нейронних мереж	+	-	-	-	Можливість використання користувацьких нейронних мереж.
Побудова хмари слів	+	-	+	+	Візуалізація найбільш часто вживаних слів у датасеті для швидкого ідентифікування ключових тем.
Вбудовані моделі для досліджень у сфері соц. наук	+	-	+	+	Наявність готових моделей ML для задач, що корисні для досліджень у соціальних науках.
Алгоритмічна прозорість	+	-	-	+	Відкритість деталей алгоритмів, що лежать в основі обробки та аналізу даних.
Відкритість продукту для спільноти	+	-	-	-	Можливість учасників спільноти вносити зміни або адаптувати продукт під власні потреби.

**Результати та основний матеріал дослідження.** В рамках даної роботи передбачалась розробка моделі для категоризації новинних повідомлень за тематикою. Це вимагає застосування ефективних алгоритмів машинного навчання, здатних точно ідентифікувати ключові особливості тексту та відносити його до відповідної категорії. Декілька популярних алгоритмів для класифікації текстів включають: наївний басів класифікатор [3], метод опорних векторів [4], RNN [5], BERT [6]. Кожен з цих алгоритмів має свої особливості.

Проаналізувавши всі переваги та недоліки кожного з алгоритмів текстової класифікації було прийняте рішення про використання нейронної мережі архітектури BERT для задачі класифікації новин. Обмежена кількість даних, що були зібрані та розмічені вручну в рамках даної роботи, виключає можливість тренування будь-якої нейронної мережі з нуля. Окрім цього, функціонал застосунку не передбачає класифікацію даних в режимі реального часу, відповідно обмежена швидкість роботи мережі на основі BERT не буде критичним недоліком. На додаток у вільному доступі існує велика кількість різноманітних перед тренуваних моделей даної архітектури, навчених на великих корпусах даних. Використання такого підходу з переднавченою та в подальшому адаптованою моделлю дозволяє створити ефективну класифікаційну систему навіть маючи обмежений набір даних. Використано базову multilingual версію моделі BERT. Дана модель підтримує обробку тексту одразу на кількох мовах, включаючи українську та російську. Це критично важливо, оскільки завданням застосунку є аналізувати українські новинні потоки (як україномовні так і російськомовні) та російськомовну пропаганду. Можливість моделі ефективно працювати з текстами на обох мовах є ключовою для досягнення поставлених цілей.

Головною функцією програмного забезпечення є завантаження користувацьких моделей машинного навчання, побудова статистичних звітів на основі вбудованої моделі, побудова статистичних звітів на основі користувацької моделі, побудова звітів типу «хмара слів» на основі вбудованої моделі та побудова звітів типу «хмара слів» на основі користувацької моделі, більше функцій можна побачити на рисунку 1.

Ретельний аналіз варіантів використання дозволив визначити ключові сценарії взаємодії користувачів із системою, виокремивши основні функції, які має підтримувати розроблюваний застосунок. Вивчення системних вимог дало змогу уточнити технічні аспекти та умови експлуатації системи, що є важливим для забезпечення її стабільної роботи та інтеграції з іншими сервісами. Формулювання функціональних вимог відобразило детальний опис основних задач, які повинна вирішувати система, включаючи підтримку користувацьких моделей, управління шаблонами візуалізації, генерацію та управління звітами. Це дозволило чітко визначити обсяг робіт та функціональні можливості застосунку. Нефункціональні вимоги, в свою чергу, окреслили ключові якісні характеристики системи, такі як масштабованість, надійність, точність, юзабіліті, безпека, що забезпечують зручність використання застосунку та його ефективність.

Для вебзастосунку обрано мікросервісну архітектуру. Такий вибір обумовлений потребою у високій масштабованості, гнучкості управління окремими компонентами системи, спрощенням процесу розробки та тестування за допомогою декомпозиції функціоналу на незалежні сервіси.

Вибір засобів розробки був обґрунтований на основі аналізу наявних інструментів та специфіки задач, що стоять при побудові даного проєкту. Зокрема, було визначено використання мови програмування Python з використанням фреймворку FastAPI для бекенду та React для фронтенду, забезпечуючи таким чином ефективність та сучасність вебзастосунку.



Рисунок 1 – Діаграма варіантів використання

В якості фундаменту для класифікаційної моделі обрано Base Multilingual BERT (mBERT), який забезпечує широкі можливості для розуміння різноманітних мов. Дана модель має використовує 12 шарів енкодерів та має близько 110 мільйонів параметрів.

Поверх базової мультимовної версії BERT було додано два шари нейронів, задачею яких буде власне класифікація новин. Перший додатковий шар складається з 128 нейронів і відповідає за виділення більш специфічних особливостей із векторних представлень mBERT, які можуть бути важливими для розрізнення категорій новин.

Другий шар, який є кінцевим у моделі класифікації, містить 5 нейронів, що відповідають за 5 категорій новин: Crisis, Economical, Political, Corruption та Other. Кожен нейрон у цьому шарі представляє одну категорію, і активація цих нейронів відбувається через функцію softmax, яка перетворює вихідні значення нейронів на ймовірності приналежності введення до кожної з категорій.



По завершенню навчання модель була протестована на окремому тестовому наборі даних, що не входив до тренувального датасету, демонструючи точність класифікації на рівні 97.8%. Такий високий показник точності свідчить про те, що модель добре узагальнила навчальні дані та здатна ефективно класифікувати новини за категоріями, що є підтвердженням досягнення мети розробки.

**Висновки.** Розроблений вебзастосунок вносить свій вклад у сферу агрегації, обробки та візуалізації текстових даних. Враховуючи відкритість даного проєкту для спільноти та актуальність аналізу соціальних тенденцій, дана робота може сприяти розвитку наукових досліджень в області соціології та політології, де аналіз соціальних мереж і медіа є ключовим для розуміння суспільних процесів.

Застосунок дозволяє науковцям, аналітикам та студентам не тільки доступатися до потужних інструментів для обробки великих обсягів даних, але й участь у його вдосконаленні та налаштуванні під конкретні дослідницькі задачі завдяки його відкритому коду. Це сприяє не лише академічній співпраці, але й стимулює інноваційні підходи та методики в аналізі текстової інформації, роблячи дослідження більш глибокими та об'єктивними.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Що таке NLP [Електронний ресурс] // Metinvest Digital. – Режим доступу до ресурсу: <https://metinvest.digital/ua/page/1052>. - Назва з екрана.
2. Результати всеукраїнського опитування для Консультативної місії Європейського Союзу в Україні [Електронний ресурс] / Київський міжнародний інститут соціології. - 2023. - Режим доступу: [https://kiis.com.ua/materials/pr/20231026\\_r/AReport\\_PublicSurvey\\_EUAM\\_sept2023\\_ukr\\_public.pdf](https://kiis.com.ua/materials/pr/20231026_r/AReport_PublicSurvey_EUAM_sept2023_ukr_public.pdf). - Назва з екрана.
3. Naïve Bayes [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.ibm.com/topics/naive-bayes>. - Назва з екрана.
4. Cortes C., Vapnik V. Support-Vector Networks [Електронний ресурс] // Machine Learning. - 1995. - Vol. 20, No. 3. - Pp. 273-297. - Режим доступу: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00994018>. - Назва з екрана.
5. Goodfellow I. Deep Learning / Goodfellow I. Bengio Y. Courville A. – Cambridge, MA : MIT Press, 2016. – 367 с.
6. Devlin J., Chang M.-W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding [Електронний ресурс] / Jacob Devlin, Ming-Wei Chang, Kenton Lee, Kristina Toutanova // arXiv preprint arXiv:1810.04805. - 2018. - Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1810.04805>. - Назва з екрана.
7. Kingma D., Ba J. Adam: A method for stochastic optimization [Електронний ресурс] / Diederik P. Kingma, Jimmy Ba // arXiv preprint arXiv:1412.6980. - 2014. - Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>. - Назва з екрана.

Received 14.05.2024.

Accepted 16.05.2024.

***Software for analyzing text information from Telegram***

*In the modern world of information technologies, the development of the Internet has led to a rapid increase in the amount of information. Accordingly, applications that can facilitate work with this information are gaining special relevance today. In this context, systems of aggregation and classification of textual information, which are used to process data from various sources, including telegram channels, deserve special attention.*

*World trends in this area indicate a growing need for improving tools for processing textual information, which stimulates scientific research and the development of new technologies. The importance of such systems is confirmed by active developments in this field by IT companies and universities around the world. The most active field of research is the use of machine learning models for text analysis, which opens up new opportunities for increasing the efficiency of data processing.*

*In the context of developing systems for the analysis of textual information, many existing solutions face challenges related to scalability and adaptation to various types of data. However, this work seeks to approach the development of such software from a different angle, focusing its attention on the flexibility and openness of the system to the community. The application supports a limited set of built-in machine learning models optimized for different text data classification tasks, while offering users the ability to integrate their own models according to their unique needs. This approach not only provides a foundation for a wide range of applications, but also promotes community development and innovation by taking advantage of collective intelligence.*

*Software is offered - a web application for analyzing text information from Telegram. Possible areas of application of the developed application cover a wide range of industries - from digital marketing and social research to news analysis and scientific research.*

*Keywords: analysis of text information, machine learning models for text analysis, BERT, classification.*

**Макаров Ілля Сергійович** – студент кафедри інформатики та програмної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Ліхоузова Тетяна Анатоліївна** – к.т.н., доцент кафедри інформатики та програмної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Makarov Illia** – student, Department of Informatics and Software Engineering National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

**Likhousova Tetiana** – PhD, associate professor, Department of Informatics and Software Engineering National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

## АНАЛІЗ СЕРВІСІВ ДЛЯ ПІДТРИМКИ РОБОТИ БІБЛІОТЕКИ

*Анотація. Нині майже всі сфери послуг надають уявлення про свій сервіс онлайн. Це спрощує кінцевим користувачам пошук та порівняння, та заохочує їх вибір. Тож, щоб зробити бібліотечні книги більш привабливими для читачів, спершу потрібно полегшити пошук та ознайомлення з ними. Відсутність необхідності тривалого перебування в приміщенні, фізичного пошуку потрібного користувачу примірника, ручного огляду та порівняння, економить час і мотивує читача користуватися послугами бібліотеки. Проте більшість бібліотек не мають сучасних електронних ресурсів, а їх каталоги застарілі та малофункціональні. Щоб зберегти свою роль у цифрову добу, бібліотекам потрібно оновлюватися, пропонувати зручні електронні каталоги та інші онлайн-сервіси, щоб краще відповідати потребам сучасних читачів та стандарту в інших сферах послуг.*

*Метою дослідження є оновити бібліотечні сервіси для кращої взаємодії з читачами: спростити каталоги, запропонувати зручний пошук, рекомендації, позначки книг та онлайн-повернення. Запропоновано перелік вимог до програмного забезпечення для підтримки роботи бібліотеки.*

*Ключові слова: бібліотечні сервіси, аналіз текстів, пошукова система, рекомендаційна система.*

Бібліотека – інформаційний, культурний, освітній заклад (установа, організація) або структурний підрозділ, що має упорядкований фонд документів, доступ до інших джерел інформації та головним завданням якого є забезпечення інформаційних, науково-дослідних, освітніх, культурних та інших потреб користувачів бібліотеки [1]. Вона надає фізичний або цифровий доступ до різних матеріалів і може існувати як фізичне місце, віртуальний простір або обидва одночасно.

В цілому, електронну бібліотеку представляє каталог та пошук по ньому. Система дає можливість додавати, змінювати та видаляти інформаційні об'єкти, а каталог забезпечує представлення збереженої інформації. Він являє собою списки чи таблиці з ключовою інформацією, котрі розділяються пагінацією. Пошук є основною навігацією та відображає за певним відповідником в каталозі всі підходящі варіанти, а для більш точного пошуку задіюється не один відповідник. Решту навігації представляє сортування результатів за вибраним заголовком. Бажаний запис можна переглянути аби отримати повну інформацію.

Більшість електронних каталогів використовують готові платформи, CMS, тому мають однаковий вигляд та функціонал. Вони містять правила пошуку, що відрізняються додатковим функціоналом, кількістю полів пошуку та інформацією, що відображується. Більшість

функцій реальної бібліотеки залишаються такими ж, і немає сенсу їх інтегрувати або ж переносити в електронний вигляд. Саме тому більшість бібліотек обмежується простим функціоналом і не оновлює свої вебсайти, тому вони виглядають дуже застаріло.

**Метою дослідження** є оновити бібліотечні сервіси для кращої взаємодії з читачами: спростити каталоги, запропонувати зручний пошук, рекомендації, позначки книг та онлайн-повернення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розглянемо електронні каталоги бібліотек України та Європи. На жаль, не всі бібліотеки надають доступ до ресурсу, адже вимагають авторизуватися. Авторизація відбувається за читацьким квитком, який оформлюється в бібліотеці, або ж за номером студентського квитка (у деяких університетських бібліотеках). Ті, що надають доступ, все рівно обмежують частину функціоналу для неавторизованих користувачів, тож повністю впевнитись в існуванні функціоналу чи його справній роботі неможливо. Такі каталоги часто використовують готові платформи, тож мають однаковий функціонал та вигляд. Це, наприклад, електронні каталоги НТБ КПІ ім. Ігоря Сікорського [2] (рисунок 1), Наукової бібліотеки НаУКМА [3], ЛННБ України ім. В. Стефаника [4], що користуються інтегрованою бібліотечною системою ALEPH компанії Ex Libris [5]. Решта користуються власними вебзастосунками, котрі здебільшого відрізняються дизайном, але не підходом.

Каталог майже завжди має вигляд списку чи таблиці з пагінацією – на одній сторінці певна кількість записів, іноді налаштовувана. Перевага таблиць – краща упорядкованість заголовків та інформації, а також можливість сортування записів за різними заголовками. У списках зазвичай це рядок у певному форматі, а сортування здійснюється за допомогою відповідної кнопки чи опції з випадючого списку. Натискання на назву документу, розширює запис додатковою інформацією, або ж відкриває сторінку з повною інформацією про документ та можливими діями з цим документом (рисунок 2).

The screenshot shows the main interface of the electronic catalog. At the top, there is a header with the logo of ALEPH and the text 'Електронний каталог НТБ КПІ ім. Ігоря Сікорського'. Below the header, there are several navigation tabs: '[ Загальний каталог ]', 'Нові надходження', 'Рідкісні видання', 'Матеріали до курсів', 'Інші колекції', 'Інші каталоги...', 'Відгуки', and 'Допомога'. The 'Загальний каталог' tab is active, showing a 'Перегляд' (View) button. Below the tabs, there is a search bar with the text 'Введіть слово чи фразу' and a search button. There are also options for 'Пошук у полі' (Search in field) and 'Слова поруч?' (Words together?). Below the search bar, there are filters for 'Мова:' (Language), 'Рік:' (Year), 'Типи:' (Types), and 'Місце знаходження:' (Location). The 'Мова:' filter is set to 'Мови:' (Languages), 'Рік:' is set to 'Використовуйте повний рік (pppp) та "?" для скорочення' (Use full year (pppp) and '?' for abbreviation), 'Типи:' is set to 'Типи:' (Types), and 'Місце знаходження:' is set to 'Всі' (All). Below the filters, there is a section for 'Підказки до пошуку:' (Search tips) with four numbered items:

- 1 Якщо вибрати "Так" в меню "Слова поруч" і ввести *Історія України*, то система знайде лише ті записи, де наступним після слова *Історія* буде слово *України*.
- 2 Маленькі та великі літери при пошуку рівнозначні. Наприклад, шукаючи *computer*, система також знайде записи, які містять *Computer* чи *COMPUTER*.
- 3 Під час пошуку дозволяється використовувати Булеві оператори **AND**, **OR**, **NOT** та дужки. Наприклад, ввівши (економіка OR фінанси) AND Україна, Ви знайдете всі записи, які мають слова *економіка* або *фінанси* разом зі словом *Україна*. Застосуйте знак \* (зірочка) для пошуку слів, що частково збігаються. Наприклад, в результаті пошуку *україн\** буде знайдено *Україна*, *Україну*, *українська*, *український*, *українського* і т.д. Пошук *\*логія* знайде слова *філологія*, *екологія* і т. д. Знак \* можна використовувати і в середині пошукового терміну. Наприклад, пошук *істор\*я* знайде записи із словами *історія* та *історіографія*.

At the bottom of the page, there is a small text: 'Powered by ALEPH (Ex Libris)'.

Рисунок 1 – Електронний каталог НТБ КПІ ім. Ігоря Сікорського

**НАУКОВА БІБЛІОТЕКА**  
*і.м. М.Максимовича*

Вихід

Увага! Відтепер можна отримати пластиковий читацький квиток також за адресою:  
проспект академіка Глушкова 2, кім. 217.  
[Підробити читайте тут.](#)

[Список змістів](#) (0 документів)  
[Ваше замовлення](#) (0 книг)  
[Перегляд стану та історії замовлень](#)  
[Допомога](#)

[Назад](#) [Новий пошук](#)

**Опис документа:**

Шифр:	8у(Шевченко)
Авт. знак:	З його
Назва:	"З його духа печаттю..."
Від. щодо назв.:	Шевченкознавчі студії
Відповідальність:	Мін-во освіти і наук України; Одеськ. нац. ун-т ім.І.І.Мечникова; Вишов. ред. Є.М. Прісовський
Видовицтво:	Астропринт
Місто:	Одеса
Рік:	2004
Сторінок:	152с.
ББК:	Ш5(4Укр)5-4(Шевченко)4,0а43
ISBN:	966-318-254-7
Тип документу:	Книга

[Додати до замовлення](#) [Повідомити про помилку в описі](#) [Додати до списку](#)

Рисунок 2 – Опис документа в Науковій бібліотеці ім. М. Максимовича КНУ ім. Т. Шевченка [6]

Кожен з них так чи інакше відображає записи за результатами пошуку. Тож, наприклад, вибір книг за категорією «садівництво» є результатом атрибутного пошуку (рисунок 3), а відображення останніх надходжень – результат символічного пошуку з використанням параметрів та логічних операторів (рисунок 4).

subject:(&quot;) AND subject:(gardening) Search Build Search

Catalogue Search for "subject:"gardening""

**Refine Your Search** Results 1 - 10 of 100 Sorted by Relevance

Результати пошуку : Дата інвент= 20240311->20240318 and Сл-Ном.партії= 202\*;  
Відсортовано за : Рік(С)/Автор

Сортувати за : Автор(3)/Рік Автор(С)/Рік Назва(3)/Рік Назва(С)/Рік Рік(3)/Автор Рік(С)/Автор Автор/

Формат : — Таблиця — Список — Список коротко (авт.,назва) — Список (назви)

**Записи 1 - 3 з 81 (Максимальне відображення: 9000 записів)**

#	Автор ↑ ↓	Назва ↑ ↓
1	<input type="checkbox"/> Вихляев, Юрій Миколайович,	Рекреаційні технології :
2	<input type="checkbox"/> "Диктатори ХХ-ХХІ століть: тоталітарні режими та наслідки для суспільства", Міжнаро	Диктатори ХХ-ХХІ століть: тоталітарні режими та наслідки для
3	<input type="checkbox"/> Ітурбе, Антоніо,	Бібліотекарка з Аушвіцу :

Ви можете змінити Ваш пошук:  
wdi = ( 20240311->20240318 ) and WPT = ( 202\* )

Рисунок 4 – Останні надходження за тиждень в каталозі НТБ КПІ

Для порівняння аналогів відібрано 4 електронні каталоги (далі в дужках скорочене позначення): НТБ КПІ ім. Ігоря Сікорського (КПІ), Наукової бібліотеки ім. М. Максимовича КНУ ім. Т. Шевченка (КНУ), Національної бібліотеки України ім. Ярослава Мудрого (Мудр) [8] та бібліотеки Ради округу Ланкашир (Ланк). Досліджувались багато різних ресурсів, але вибір зупинився на цих через авторитетність: провідні університети України, визначні бібліотеки, іноземна урядова бібліотека. А також через доступність функціоналу (згадана вище авторизація), його адекватність та роботоспроможність. Варто зазначити, що дослідити можна лише частину застосунку, що доступна читачу, а частину адміністраторів та працівників бібліотеки з відкритих джерел дослідити не можливо. Порівняння зображено в таблиці 1.

Слід відмітити, що не весь згаданий функціонал реалізований повністю чи відповідно (позначка “\*” в таблиці). Розширений пошук може бути реалізованим з використанням лише двох-трьох полів і лише з логікою “AND”. Також сортування може бути лише за двома заголовками чи працювати не зовсім коректно. Інтерактивним може бути лише один заголовок, або він може бути унікальним, і належати лише одному запису.

Таблиця 1

Порівняння існуючих рішень

Функціонал	КПІ	КНУ	Мудр	Ланк	Пояснення
Стандартний пошук	+	+	+	+	Пошук за одним відповідником, назвою документу
Розширений пошук	+	*	*	+	Пошук за кількома відповідниками (полями)
Додаткова логіка в пошуку	+			+	Пошук з використанням параметрів, знаків та логічних операторів
Сортування	+	*		*	Сортування результатів пошуку за заголовками
Інтерактивні заголовки	+		*	+	Можливість взаємодіяти із заголовками для подальшого пошуку чи дослідження заголовку
Детальний опис	+	+		+	Можливість відкрити повний опис документу
Перевірка наявності	+			+	Перевірка кількості примірників
Особистий кабінет	+				Особистий кабінет користувача, що містить всю особисту інформацію та інформацію для взаємодії із бібліотекою, а також додаткові налаштування
Закладки, власний список	+	+		+	Збереження у список користувачем цікавих йому книг
Замовлення, бронювання	+	+		+	Можливість зарезервувати примірник у бібліотеці за читацьким квитком

Функціонал	КПІ	КНУ	Мудр	Ланк	Пояснення
Повинності	+				Список заборгованих користувачем книг
Рекомендації	*			*	Створення рекомендацій на основі переглянутої користувачем літератури, та рекомендації схожої літератури до вибраного примірника
Генерація читацького квитка					Генерація номера читацького квитка при реєстрації та його подальша верифікація
Нагадування					Надсилання нагадувань на електронну пошту про термін повернення книги

Щодо рекомендацій, то в каталозі НТБ КПІ та в іноземній бібліотеці вони реалізовані блоком з пропозиціями на сторінці з повним описом книги. Схоже на те, що рекомендовані книги та документи додані вручну, адже лише деякі сторінки містять їх. А при переході на запропоновані варіанти, вони або не містять пропозицій, або ж перелічений такий самий набір рекомендованих книжок. Також помітно, що ці записи не пов'язані між собою описом, автором чи навіть жанром, що також вказує на те, що вони додані вручну.

З досліджень можна виділити той факт, що для авторизації чи інших певних дій, користувачу необхідно попередньо володіти читацьким квитком. Тож можна запропонувати рішення з його генерації, що дозволить зареєструватися новому читачу з електронною поштою, та користуватися усім необхідним функціоналом. Подальша верифікація згенерованого читацького квитка та користувача робиться у вебзастосунку працівником бібліотеки, наприклад, при очному відвідуванні читачем бібліотеки та демонстрації згенерованого читацького квитка. А використати електронну пошту читача можна для нагадувань про термін повернення книги.

**Результати та основний матеріал дослідження.** Метою дослідження є формування вимог до вебзастосунку, що покращить взаємодію читачів з бібліотекою, полегшить пошук і вибір книги, а також каталогізацію робітникам бібліотеки, тобто проєкт спрямований на покращення досвіду користувачів бібліотеки за допомогою оновлення та оптимізації відомих технічних рішень схожих бібліотечних сервісів. Для цього необхідно спростити каталоги, запропонувати зручний та точний пошук, рекомендації, покращити взаємодію користувача з книгами, а також зробити зручні способи контролю боргів для користувачів і працівників.

Тож, вебзастосунок розрахований на використання як працівниками бібліотеки, так і відвідувачами. Адміністратори мають можливість заповнювати і змінювати каталог та іншу необхідну для нього інформацію. Для збереження цілісності та валідності даних, необхідно максимально розділяти всю інформацію про книги. Наприклад, на адміністративній сторінці будуть різні відповідні форми та списки для додавання та контролю всіх відповідників, такі

як жанри чи автори, аби надалі користуватися ними при додаванні книг та для покращення інтеракції із записами в каталозі.

Для контролю над боргами пропонується вести облік у списках, які можна легко сортувати а також знаходити необхідний запис, і змінювати чи видаляти його. Борг заноситься у систему бібліотекарем, коли користувач забирає книгу. Для цього користувач, що зареєстрований у системі, показує свій згенерований читацький номер, або ж повідомляє про те, що попередньо забронював книгу. Також пропонується робити нагадування читачу про повернення книги за електронною поштою.

Читачі можуть вільно користуватися каталогом, проте реєстрація чи авторизація в системі, дозволяє їм користуватися додатковим функціоналом. Це, наприклад, збереження цікавих книг, бронювання, контроль боргів чи можливість залишити оцінку книзі. За цими даними, читачеві можуть формуватися рекомендації книг.

Також пропонується зробити гнучкий пошук, який буде видавати точніші результати. Для ще більш точнішого пошуку буде розширений пошук за кількома полями, а також можливість сортування результатів чи взаємодії із заголовками (наприклад, відображення книжок вибраного автора). На сторінці вибраної книги також будуть рекомендації зі схожими книгами.

На наступних рисунках описано приклади основних бізнес-процесів з використанням BPMN моделей.

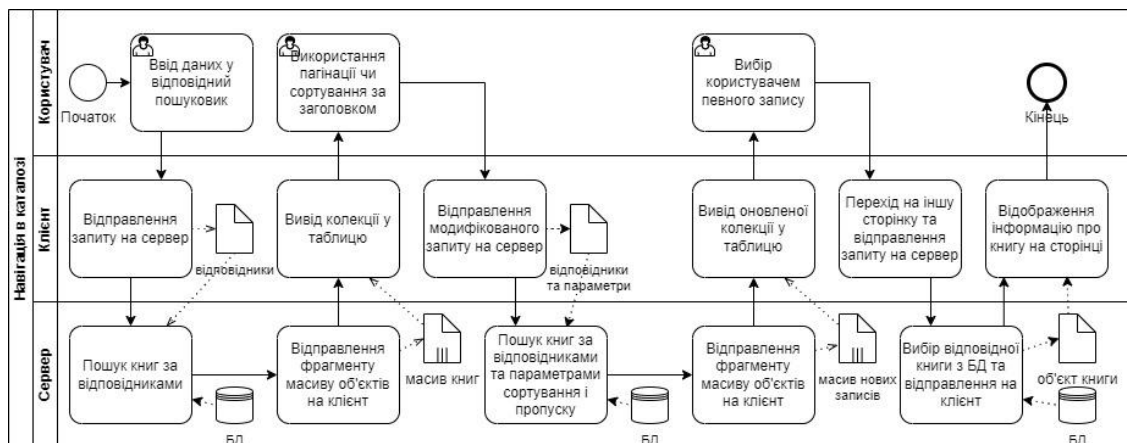


Рисунок 5 – Схема бізнес-процесу навігації в каталозі

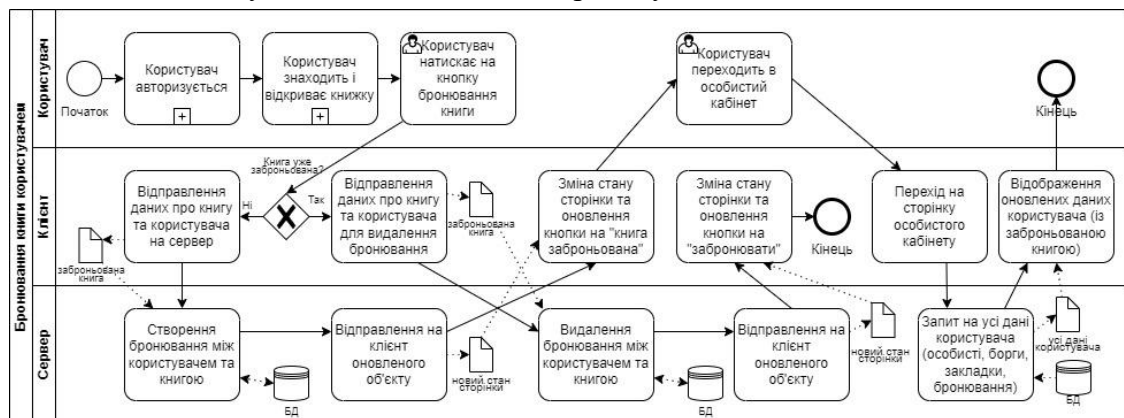


Рисунок 6 – Схема бізнес-процесу бронювання книги та оновлення даних в особистому кабінеті

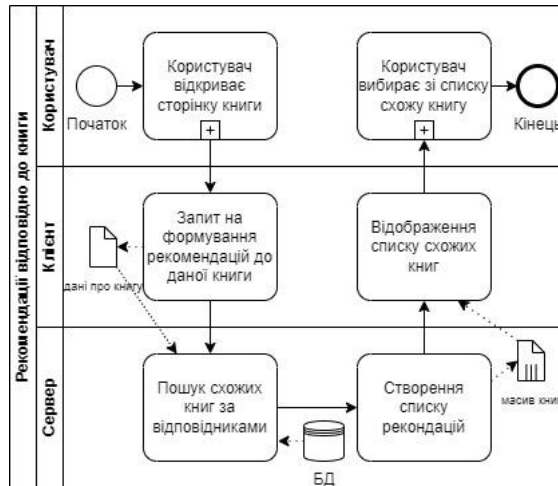


Рисунок 7 – Схема бізнес-процесу рекомендації схожих книг

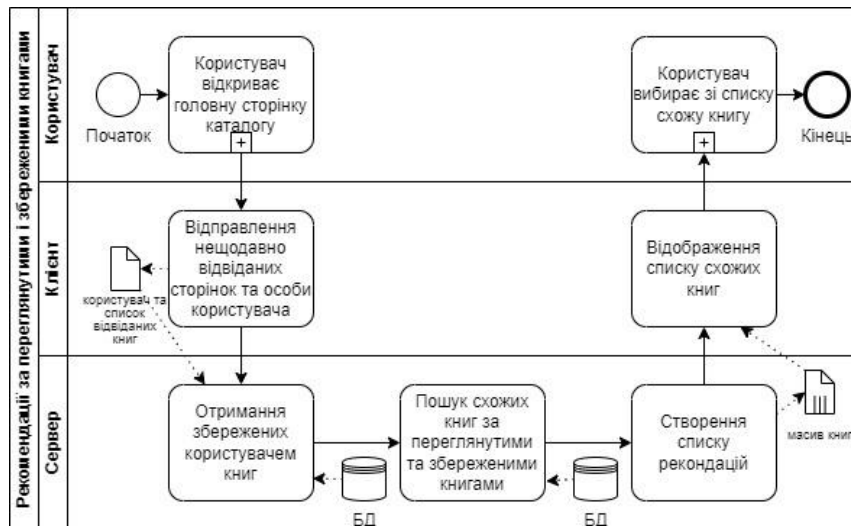


Рисунок 8 – Схема бізнес-процесу рекомендації книг відповідно до активності користувача та його вподобань

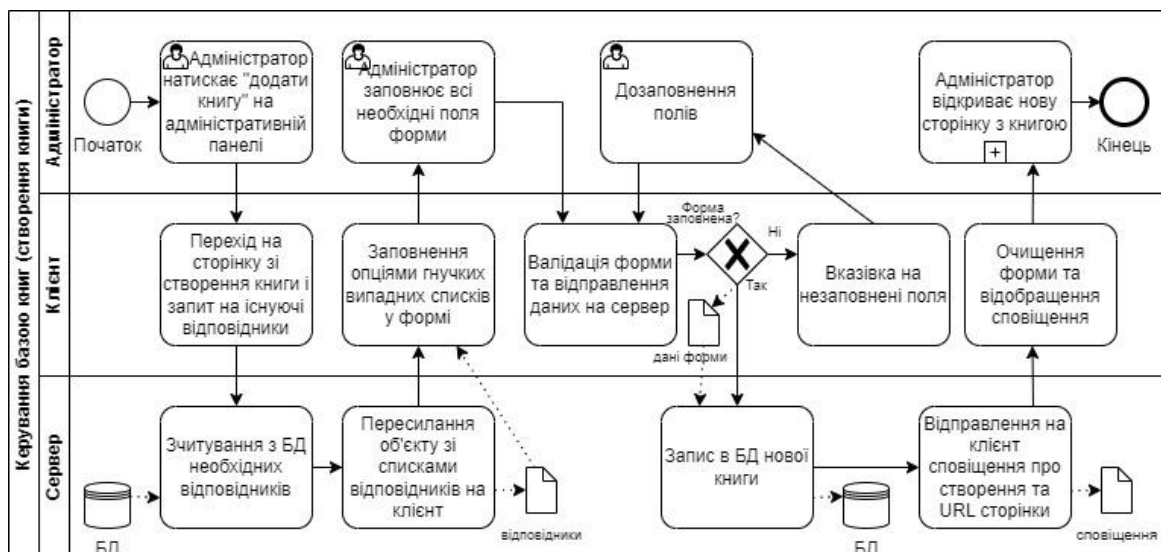


Рисунок 9 – Схема бізнес-процесу додавання нової книги в базу даних

Шляхом аналізу відомих технічних рішень було визначено, що найкращими для розробки вебзастосунку є використання клієнт-серверної архітектури та архітектурного патерну MVC. Для серверної частини вибрано Node.js з використання вебфреймворку Express.js, і реляційної бази даних MySQL. Для клієнтської частини вибрано використання бібліотеки для створення інтерфейсів React, з усіма іншими необхідними пакетами.

**Висновки.** Для покращення сервісів, що надає бібліотека, варто:

- внести зміни в логіку та представлення каталогів, реалізувати зручні інструменти для роботи з ними та їх заповнення корисною для системи і користувача інформацією;
- ввести необхідний додатковий функціонал для зручнішого користування та роботи із вебзастосунком і взаємодією з бібліотекою в цілому;
- використати сучасніші та гнучкіші алгоритми пошуку;
- зробити дані, що виводяться, більш інтерактивними та ввести систему рекомендацій для покращення знаходження необхідного примірника.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Верховна Рада України: Закон України «Про бібліотеки і бібліотечну справу» від 27.01.1995 № 32/95-ВР. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/32/95-%D0%B2%D1%80#Text> (дата звернення: 17.03.2024).
2. НТБ КПІ ім. Ігоря Сікорського: Електронний каталог. URL: <https://opac.kpi.ua/F/> (дата звернення: 18.03.2024).
3. Наукова бібліотека НаУКМА: Електронний каталог. URL: <http://194.44.142.55/F> (дата звернення: 18.03.2024).
4. ЛННБ України імені В. Стефаника: Електронний каталог. URL: <http://aleph.lsl.lviv.ua:8991/F> (дата звернення: 18.03.2024).
5. Integrated Library System Aleph. URL: <https://exlibrisgroup.com/products/aleph-integrated-library-system/> (дата звернення: 18.03.2024).
6. Наукова бібліотека ім. М. Максимовича КНУ ім. Т. Шевченка: Електронний каталог. URL: <http://www.library.univ.kiev.ua/ukr/elcat/new/poshuk.php3> (дата звернення: 18.03.2024).
7. Lancashire Country Council: Digital library catalogue. URL: <https://prism.librarymanagementcloud.co.uk/lancashire/home> (дата звернення: 18.03.2024).
8. Національна бібліотека України ім. Ярослава Мудрого: Електронний каталог. URL: <http://catalogue.nlu.org.ua/> (дата звернення: 18.03.2024).

Received 14.05.2024.

Accepted 17.05.2024.

#### *Analysis of services to support library work*

*Nowadays, almost all service areas provide an overview of their service online. This makes it easier for end users to search and compare and encourages them to choose. So, to make library books more attractive to readers, you first need to make them easier to find and read. The absence of the need for a long stay in the premises, physical search for the copy the user needs, manual inspection, and comparison saves time and motivates the reader to use library services. However, most libraries do not have modern electronic resources, and their catalogs are outdated and poorly functional. To maintain their role in the digital age, libraries need to update themselves and offer*

*convenient electronic catalogs and other online services to better meet the needs of modern readers and the standard in other areas of services.*

*The goal of the study is to update library services for better interaction with readers: simplify catalogs, and offer convenient searches, recommendations, bookmarks, and online returns.*

*Several authoritative Ukrainian electronic libraries, as well as one accessible foreign one, were considered. Almost every one of them is designed for interaction with the reader who has a reader card. Also, the problem is that all of them only state the fact that the book is in the library. Because of this, finding the necessary book becomes more difficult, which does not give advantages in using the catalog. Therefore, it is recommended to improve the service to implement all the key functionality of analogs, improve search and navigation in the catalog, supplement it with a system of recommendations, and for better interaction with readers - a debt control system that will simplify the control, receipt, and return of the book, with the possibility of reminders.*

*A list of software requirements to support library work is proposed. The business processes that should be improved in the first place are described. Recommendations are provided for the selection of technical solutions for development.*

*Keywords: library services, text analysis, search engine, recommendation system.*

**Коновальчук Андрій Володимирович** – студент кафедри інформатики та програмної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Ліхоузова Тетяна Анатоліївна** – к.т.н., доцент кафедри інформатики та програмної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Konovalchuk Andrii** – student, Department of Informatics and Software Engineering National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

**Likhouzova Tetiana** – PhD, associate professor, Department of Informatics and Software Engineering National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

## АНАЛІЗ ШЛЯХІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ СТОМАТОЛОГІЧНОЇ КЛІНІКИ

*Анотація.* На сьогодні було зроблено не один крок у розв'язанні проблеми систем управління робочим процесом стоматологічних клінік. Мета дослідження – пошук можливостей автоматизувати основні процеси роботи стоматологічної клініки, підвищити ефективність роботи лікарів-стоматологів та забезпечити зручне надання послуг клієнтам. З огляду на вже існуючі продукти та їх функціонал, буде доречним покращити систему нагадувань та рекомендацій таких програм. Це може включати нагадування про найближчий візит, скасування візиту, привітання із святами, рекомендації після візиту відповідно до проведеної процедури тощо. Особистий кабінет для пацієнтів також є актуальною функцією, щоб забезпечити їм зручний доступ до їх медичної історії в будь-який час та момент.

*Запропоновано перелік вимог до програмного забезпечення для автоматизації роботи стоматологічної клініки.*

*Ключові слова:* автоматизація робочого процесу, BPMN, стоматологічна клініка, взаємодія з клієнтами.

Стоматологічні клініки, як і будь-які інші медичні установи, мають контролювати безліч процесів для отримання прибутку та розвитку справи. Клініки зіштовхуються з рядом викликів, пов'язаних із обробкою інформації про клієнтів та організацією робочого процесу. Коректне управління клієнтською базою, медичними записами, нагадуваннями про прийоми та іншими аспектами їх обслуговування є ключовим для надання якісної та своєчасної допомоги. Всі ці дані треба контролювати, аналізувати та впорядковувати, тому необхідна система, що допоможе централізувати багатогранний робочий процес фахівців в одному місці.

**Метою дослідження** є пошук можливостей автоматизувати основні процеси роботи стоматологічної клініки, підвищити ефективність роботи лікарів-стоматологів та забезпечити зручне надання послуг клієнтам.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останнє десятиліття стоматологічні клініки впроваджують системи із різноманітним функціоналом для оптимізації внутрішніх процесів та поліпшення обслуговування пацієнтів. Основні напрямки використання подібних систем є автоматизація процесу запису на прийом, ведення медичної історії пацієнтів, зберігання даних про проведене лікування та рекомендації, що дозволяє забезпечити індивідуальний та комплексний підхід до кожного клієнта. Також важливим аспектом є можливість використання в системі функціоналу для нагадування пацієнтам про заплановані візити та профілактичні обстеження, що сприяє збільшенню відвідуваності [1].

Серед усіх можливих напрямків розробки програмного забезпечення, у вебзастосунок можна найкраще впровадити робочий процес стоматологічної клініки. Вебзастосунок може використовувати комбінацію сценаріїв на стороні сервера для зберігання та отримання інформації та сценаріїв на стороні клієнта для представлення інформації користувачам.

На даний момент існує багато вебзастосунків для ведення обліку пацієнтів та робочої інформації. Такі програми розробляють спеціально для стоматологій із урахуванням усіх необхідних інструментів, що дозволяють автоматизувати буденні процеси.

Недоліки таких програм можуть виявлятися у відсутності конкретних функціональних можливостей у порівнянні з аналогічними програмами, у обмеженості або недостатній розвиненості функціональних можливостей. Також варто враховувати різницю у функціоналі між платними та безкоштовними версіями програми.

Для порівняльного аналізу обрано чотири аналогічних продукти на українському ринку, а саме iClinic [2], Зубна фея [3], Denty [4] та Зубок CRM [5]. Ці програми представляють собою інноваційні рішення для стоматологічних клінік. Вони спрямовані на автоматизацію різних аспектів робочих процесів, надаючи зручний інтерфейс та широкий функціонал для управління клінікою та обліку пацієнтів. Серед загальних можливостей цих програм – картка пацієнта із зубною формулою, зручний календар запису, керування розсиланням сповіщень, облік та замовлення розхідників, бухгалтерські функції, журнал запису пацієнтів, касові операції, звіти та інші корисні інструменти для ефективної роботи клініки.

Таблиця 1

Порівняння аналогів

Функціонал	iClinic	Зубна фея	Denty	Зубок CRM	Пояснення
Реєстратура	+	+	+	+	Розклад
База пацієнтів	+	+	+	+	Картки пацієнта
Історія візитів та лікування	+	+	+	+	Візити, оплати, проведенні процедури
Прайс-лист	+	+	+	+	Список та вартість послуг
Квитанції	+	+	+	+	Контроль та історія фінансів пацієнтів
Звіти	+	+	Примітивно	+	Звіти за день, тиждень тощо
Система нагадувань	Платне	Платне	Платне		Наприклад, візити
Зубна формула	+	+	+	+	Система опису зубів
Форма анамнезу	+	Примітивно			Медична історія
Склад	+	+			Ведення контролю матеріалів
Диспансер	+	+			Планове профілактичне обстеження чи лікування
Рівні доступу	+	+			Для різних працівників

Функціонал	iClinic	Зубна фея	Denty	Зубок CRM	Пояснення
Форма 043/о	+	+	+	+	Медична картка стоматологічного хворого
Нотатки	+				Для заміток
Файлове сховище	+	+			Для зберігання файлів тощо
Вартість/ місяць	від 800 грн.	від 1600 грн.	від 370 грн.	Безкоштовно	Вартість програми
Формування висновку, рекомендацій після процедури					Інформація щодо проведених дій, рекомендації щодо лікування та подальших кроків
Особистий кабінет для пацієнтів					Доступ до медичної історії

З аналізу програм iClinic, Зубна Фея, Denty та Зубок CRM виокремлено ряд ключових функцій, таких як реєстрація, база пацієнтів, зубна форма, квитанції, звіти. та інші не менш важливі функції. Найстаріший застосунок «Зубна Фея» має широкий набір функцій, але незручний інтерфейс користувача. Наймолодший застосунок «Зубок CRM» автоматизував здебільшого основні процеси, а другорядних процесів замало у порівнянні із іншими застосунками. Також слід звернути увагу на систему нагадувань, вона платна або відсутня у аналогах. Це досить важливий інструмент у робочому процесі клініки, тому його слід автоматизувати та покращити.

**Результати та основний матеріал дослідження.** Для опису деяких бізнес-процесів майбутнього вебзастосунку використано BPMN модель. Створено моделі адміністративних та медичних функцій, приклад моделі фінансової звітності, системи нагадувань та особистого кабінета пацієнта (рисунок 1-5).

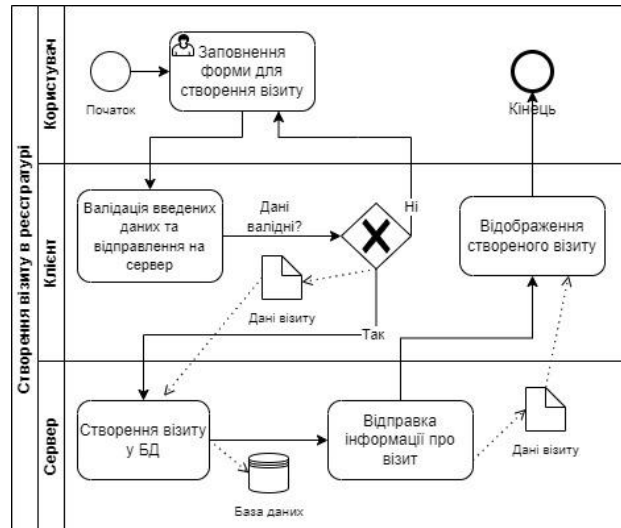


Рисунок 1 – Схема бізнес-процесу створення візиту

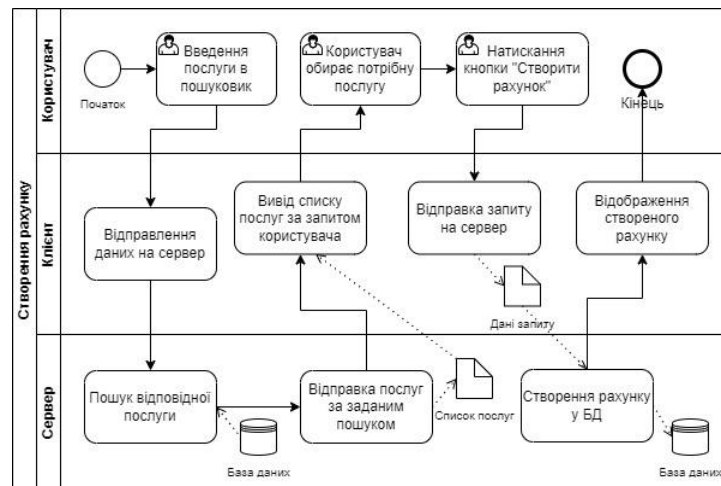


Рисунок 2 – Схема бізнес-процесу створення рахунку

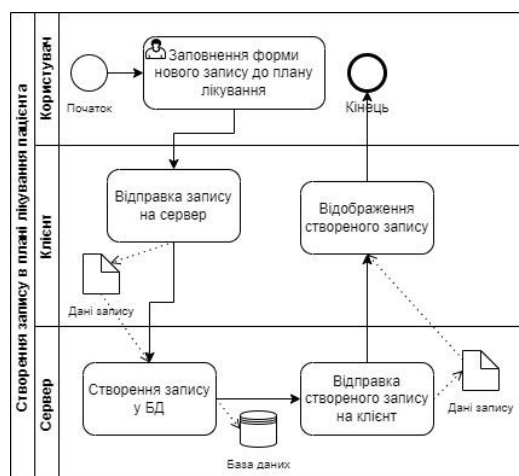


Рисунок 3 – Схема бізнес-процесу створення запису в плані лікування

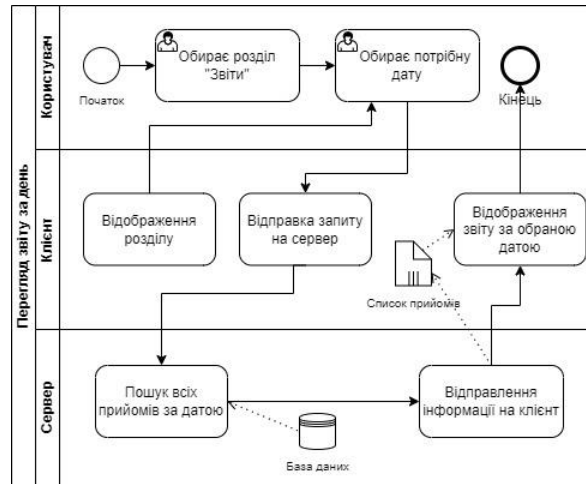


Рисунок 4 – Схема бізнес-процесу перегляду звіту за день

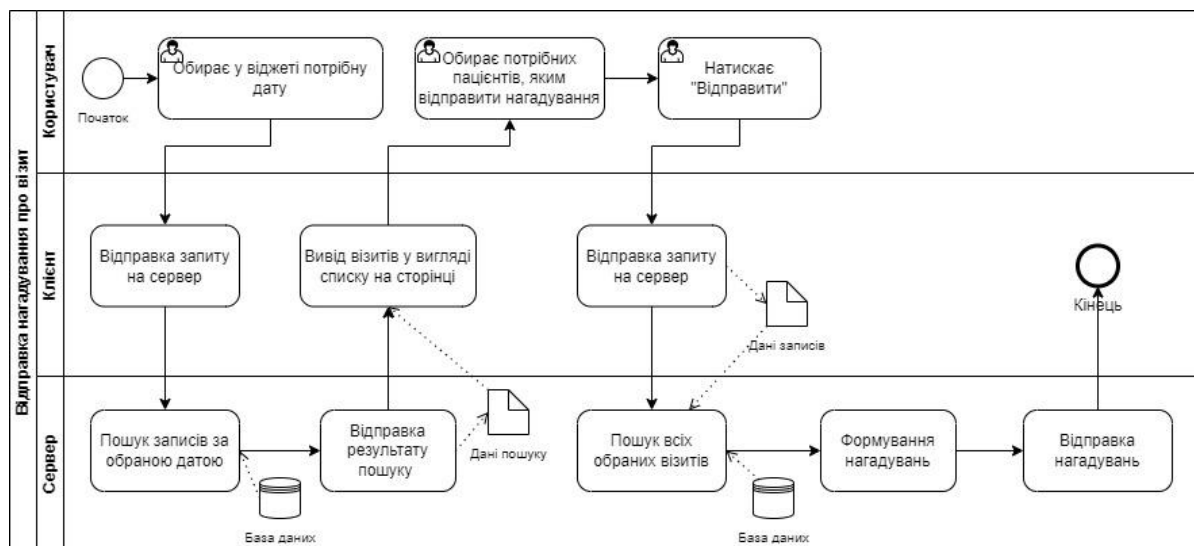


Рисунок 5 – Схема бізнес-процесу відправки нагадування про візит

Головною функцією програмного забезпечення є підвищення продуктивності роботи лікарів та автоматизація робочого процесу стоматологічної клініки. Більше функцій можна побачити на рисунку 6.

Обираючи технічні рішення для вебзастосунку, було проведено аналіз сучасних тенденцій, щоб забезпечити високий рівень безпеки, ефективну роботу застосунку та зручний інтерфейс користувача. Тож для реалізації вебзастосунку для стоматологічної клініки було обрано такі рішення: архітектурний патерн MVC, база даних MySQL, клієнт-серверна архітектура, бібліотека React.js.

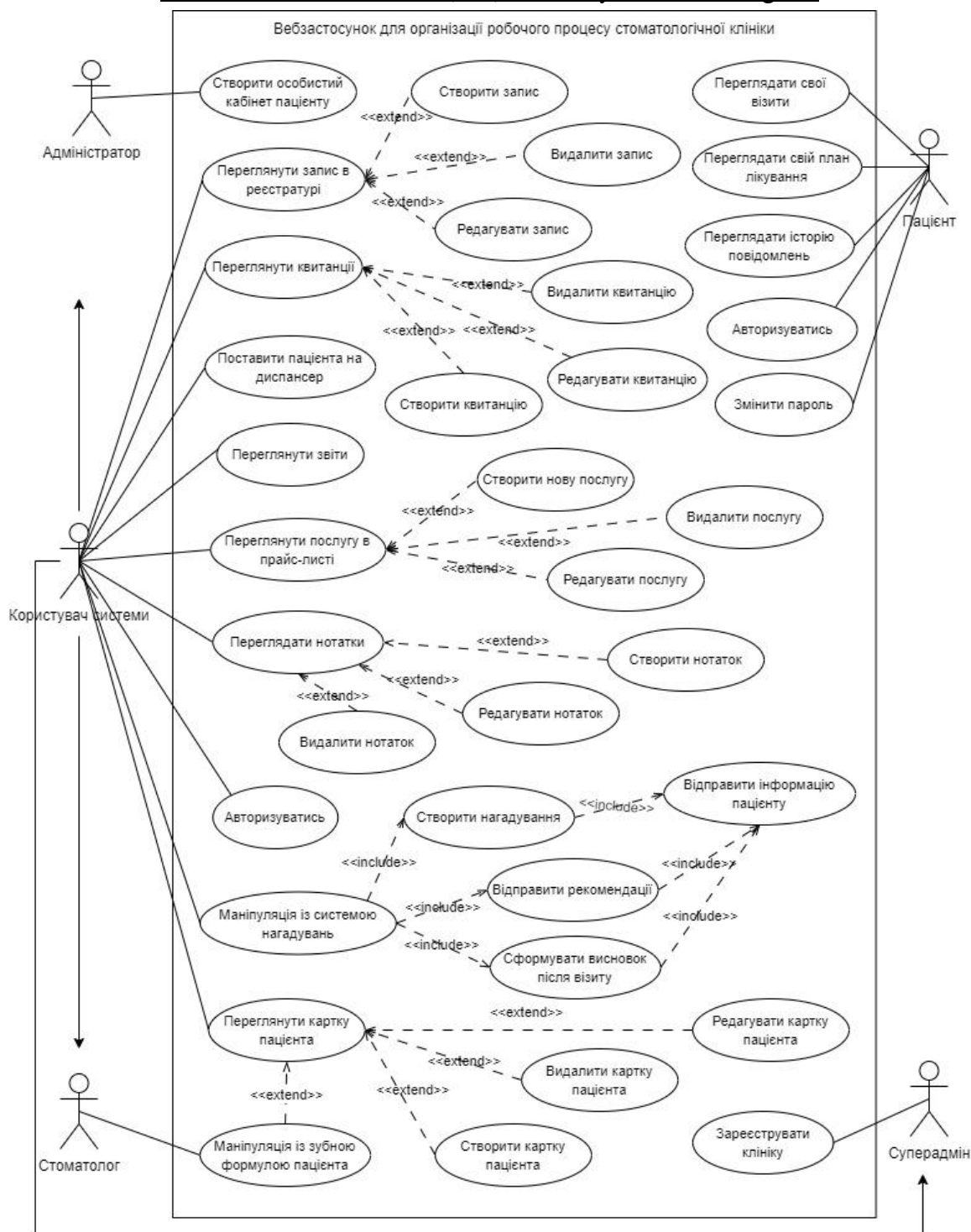


Рисунок 6 – Діаграма варіантів використання

**Висновки.** Основним функціоналом вебзастосунку мають бути медичні та адміністративні функції, такі як реєстратура, диспансер, зубна формула, формула 043/о та інші. Дані пацієнтів зберігатимуться у базі даних, де вони матимуть свою особисту карту із зубною формулою, розділом «План лікування» та анамнезом (сукупність відомостей про пацієнта і розвиток хвороб за наявності).

Задля контролю прибутків обов'язково має бути створена фінансова звітність. Після кожного оплаченого візиту, сума буде автоматично додаватись в денний звіт, який можна буде переглядати у будь-який зручний час.

Для покращення вебзастосунку рекомендовано реалізувати систему нагадувань та додати нові корисні можливості. Сюди відноситься можливість відправляти висновок та рекомендації після візиту відповідно до проведеної процедури, а також особистий кабінет пацієнта для доступу до їх медичної історії в будь-який момент.

Підсумовуючи все вище сказане, очікуваннями є спрощення та прискорення робочого процесу стоматологів, збереження медичної інформації в одному місці, забезпечення зручного надання послуг клієнтам, менеджмент часу та фінансова звітність.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Triare.net: How Dental Clinics Can Transform their Practice with CRM Software. URL: <https://triare.net/insights/dental-crm-software/> (дата звернення: 16.03.2024).
2. Програма iClinic. URL: <https://iclinic.ua/> (дата звернення: 17.03.2024).
3. ТОВ «Роял Інтеграція». URL: <https://royal.co.ua/ua/> (дата звернення: 17.03.2024).
4. Програма Denty. URL: <https://denty.com.ua/> (дата звернення: 17.03.2024).
5. Зубок CRM – програма обліку для стоматології. URL: <https://zubok-crm.com/ua> (дата звернення: 17.03.2024).

Received 14.05.2024.

Accepted 21.05.2024.

#### *Analysis of ways to automate the dental clinic's workflow*

*The purpose of the research is to find opportunities to automate the main processes of the dental clinic, to increase the efficiency of the work of dentists and to provide convenient services to clients. Considering the already existing products and their functionality, it is proposed to improve the system of reminders and recommendations of such programs. This may include reminders about the next visit, cancellation of the visit, greetings with holidays, recommendations after the visit according to the procedure carried out, etc. A personal account for patients is also a relevant feature to provide them with convenient access to their medical history at any time and moment.*

*A list of requirements for software for automating the work of a dental clinic is offered. The main functionality of the web application should be medical and administrative functions, such as registry, dispensary, dental formula, formula 043/o and others. Patient data will be stored in a database where they will have their own personal chart with dental formula, treatment plan section and medical history.*

*In order to control profits, financial statements must be created. After each paid visit, the amount will be automatically added to the daily report, which can be viewed at any convenient time.*

*To improve the web application, it is recommended to implement a reminder system and add new useful features. This includes the ability to send a conclusion and recommendations after the visit according to the procedure performed, as well as the patient's personal office to access their medical history at any time.*

*Expectations are to simplify and speed up the work process of dentists, save medical information in one place, provide convenient services to clients, time management and financial reporting.*

*Keywords: workflow automation, BPMN, dental clinic, customer interaction.*

**Полтава Віолетта Віталіївна** – студентка кафедри інформатики та програмної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Ліхоузова Тетяна Анатоліївна** – к.т.н., доцент кафедри інформатики та програмної інженерії, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського».

**Poltava Violetta** – student, Department of Informatics and Software Engineering National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

**Likhouzova Tetiana** – PhD, associate professor, Department of Informatics and Software Engineering National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute».

О.О. Кавац, Ю.В. Кавац, А.Д. Гирка, Ю.О. Кібукевич

## АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ РОЗВИТКУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ КУЛЬТУР ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

*Анотація.* Зміни клімату все більше впливають на аграрне виробництво європейських країн, сучасні методи супутникових даних пропонують практичні рішення для моніторингу стану розвитку сільськогосподарських культур із подальшим прогнозуванням їх урожайності. Рослинництво, яке значною мірою залежить від природних ресурсів і погодних умов, постійно стикається з такими небезпечними явищами, як різкі перепади температур повітря та режиму вологозабезпечення впродовж вегетаційного періоду, які напряму впливають на продуктивність культур. В статті досліджено вплив гідротермічних умов на стан розвитку сільськогосподарських рослин із застосуванням супутникового моніторингу. Дані зі супутників Landsat-8, Sentinel-1 та Sentinel-2 дозволяють виявляти особливості розвитку рослин у посівах та загрози формуванню продуктивності культур. Дослідження підтвердили, що застосування нечіткої логіки допомагає у плануванні та оптимізації виробництва сільськогосподарських культур в умовах зміни клімату.

*Ключові слова:* супутниковий моніторинг, Landsat-8, Sentinel-1, Sentinel-2, врожайність, нечітка логіка, радарні дані, розвиток сільськогосподарських рослин, погодні умови.

**Постановка задачі.** Сільське господарство, а особливо рослинництво, безпосередньо залежить від природних ресурсів та клімату. Негативні зміни погодних умов, такі як аномальна спека, повені, лісові та торф'яні пожежі, суховії, вимерзання, суттєво знижують врожайність сільськогосподарських культур. Наприклад, високі температури порушують здатність рослин отримувати та використовувати вологу, що є одним із чинників зупинки розвитку. Це є серйозною загрозою для продовольчої безпеки, адже сільське господарство є джерелом засобів до існування для великої кількості людей. За даними продовольчої та сільськогосподарської організації об'єднаних націй (ФАО) в найближчі 30 років сільськогосподарське виробництво повинно потроїтися, щоб забезпечити потреби населення у продовольстві.

Ефективним рішенням підвищення продуктивності аграрного виробництва та врожайності є застосування космічних технологій. За допомогою даних дистанційного зондування Землі можна швидко отримувати інформацію про сільськогосподарські угіддя, а саме розмір, географічне розташування ділянки, вид сільськогосподарської культури, стан її розвитку, цифрову модель рельєфу (ЦМР), проведення агротехнічних робіт на полі тощо. Супутниковий моніторинг дозволяє вирішити задачі картографування сільськогосподарських угідь, визначити стан вологості ґрунту та насаджень на різних стадіях розвитку, вчасно виявити

процеси потенційної загрози врожаю, спрогнозувати вплив погодних умов при плануванні агротехнічних робіт.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Численні дослідження показали великий потенціал методів дистанційного зондування для вирішення задач сільськогосподарського напрямку, серед яких оперативне отримання інформації про стан рослинності та вплив погодних умов на її розвиток з подальшим прогнозування врожайності. Автори роботи [1] у дослідженні ставили за мету оцінити вплив опадів на рослинність та порівняти оптичний спектральний показник NDVI із індексом радіолокаційної вегетації (RVI). Порівняння значень двох індексів рослинності показало, що індекс NDVI із загальною точністю понад 70% має найбільшу здатність відокремлювати напівгусту рослинність від густої. Однак індекс RVI є більш ефективним для відокремлення рідкої рослинності. У роботах авторів [2-4] для оцінки стану рослин, наявності хвороб, а також для прогнозування врожайності полів використовували декілька основних оптичних спектральних вегетаційних індексів, такі як NDVI, LAI, EVI. У роботі [5] дослідження показали, що традиційні моделі управління зрошувальними системами не задовольняють необхідні умови аграріїв, тому запропоновано інтелектуальну систему нечіткої логіки, яка заснована на даних зрошування полів. Результати досліджень продемонстрували здатність системи нечіткої логіки з урахуванням кліматичних змін, вирішувати невизначеності, нелінійності зрошувальної системи та встановлювати модель управління високоточними операціями. Автори роботи [6] запропонували ієрархічну нечітку експертну систему для класифікації земельного покриття на супутникових зображеннях середнього просторового розрізнення у районі Ріо-Ранчо, штат Нью-Мексико. У роботі [7] представлений алгоритм прогресивної класифікації, який визначає типи сільськогосподарських культур на основі їх фенологічного розвитку та відповідних характеристик відбиття на багаточасових супутникових знімках чотирьох датчиків Landsat-7 та -8, Sentinel-2A та RapidEye. Він розрізняє типи сільськогосподарських культур у період вегетації, починаючи з ранньої весни, точність класифікації склала 89,49%.

**Мета дослідження** полягає у розробці та апробації технології супутникового моніторингу врожайності сільськогосподарських культур на основі даних ДЗЗ за допомогою застосування нечіткої логіки з подальшою валідацією на польових дослідних ділянках.

**Основна частина.** У роботі досліджувалися сільськогосподарські ділянки загальною площею більш ніж 850 га, які належать Державній установі Інститут зернових культур Національної академії аграрних наук України та розташовані у Дніпровському районі Дніпропетровської області, Україна (див. рисунок 1).



Рисунок 1 - Супутникове зображення із векторним шаром дослідної ділянки з озимою пшеницею, Дніпропетровська область, Україна

Клімат регіону помірно континентальний з м'якою зимою. За таких умов зернові культури добре зростають. Середня температура січня становить від  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $-6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; липня — від  $+23,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $+22\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Середньобагаторічна кількість опадів у районі складає 507 мм. Менша їх частина припадає на теплий період, що може ослаблювати розвиток рослин у вегетаційний період.

Основними культурами, які вирощуються в Україні є озима пшениця, ячмінь, кукурудза, ріпак, соняшник, соя та інші. Для дослідження відібрано 15 ділянок площею 209 га із озимою пшеницею, оскільки ця культура є найбільш залежною від погодних умов.

Дослідження оцінки стану розвитку рослин проводилось за допомогою різночасових зображень, отриманих зі супутників Landsat-8, Sentinel-1 та Sentinel-2. У часовий ряд відбирались оптичні супутникові зображення з мінімальним хмарним покриттям за період із січня по грудень 2019 та 2020 року. Для первинних зображень було проведено геометричну та радіометричну корекцію для встановлення відповідності та видалення перешкод [9].

Показники середньої температури повітря та вологості ґрунту, визначають кліматичні умови та на пряму впливають на фізіологічні процеси рослин, взаємозв'язок між ними є вагомим критерієм. Наприклад, оптимальна температура сприяє активізації фотосинтезу та росту рослин, тоді як вологість ґрунту регулює доступність води для рослин, що впливає на їх водний обмін та стан кореневої системи.

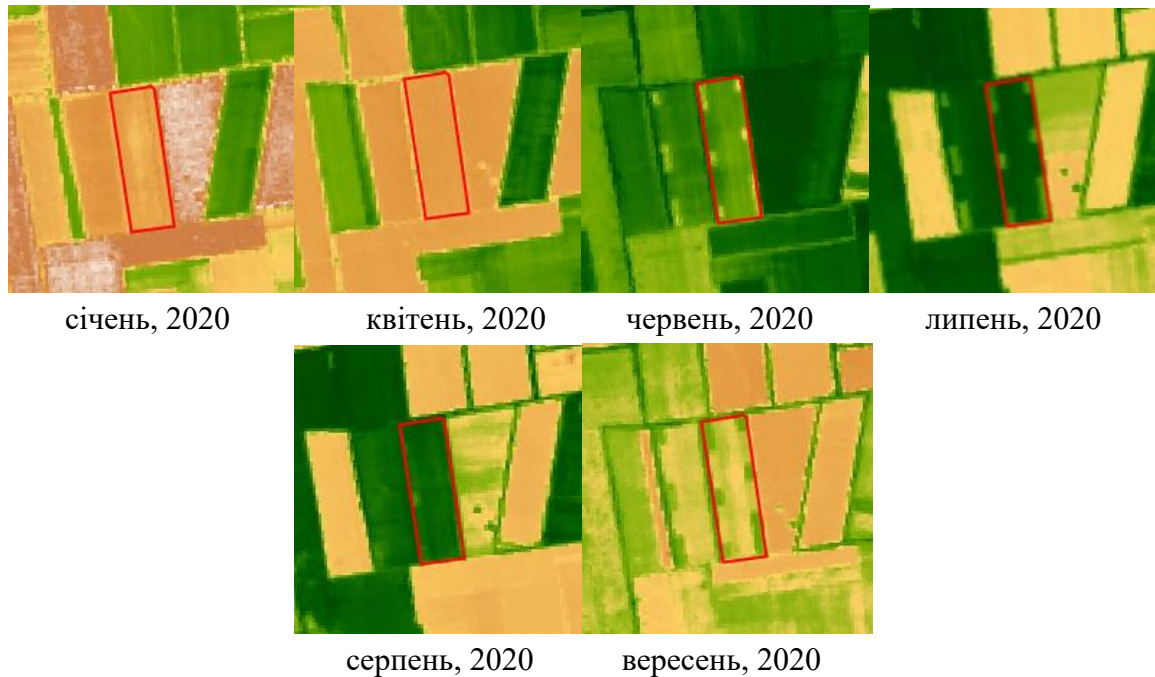


Рисунок 2 - Спектральний індекс NDVI дослідних ділянок з озимою пшеницею із супутникових зображень Sentinel-2, Дніпропетровська область, Україна

Використання нечіткої логіки дозволяє моделювати складні взаємозв'язки між цими факторами та фізіологічними процесами рослин, які часто є неоднорідними та нелінійними. Наприклад, співвідношення температури повітря до фотосинтезу дозволяє краще прогнозувати оптимальний час для збирання врожаю [10] та планувати технологічні заходи з урахуванням прогнозованих кліматичних змін. Теорія нечітких множин базується на плавному переході з одного класу в інший. Елементи можуть мати часткове членство в декількох множинах. Це особливо ефективно при аналізі даних супутникового моніторингу сільськогосподарських культур, оскільки нечіткі підходи дозволяють краще враховувати невизначеність вихідних даних. Наприклад, використання нечітких методів може допомогти краще розпізнати області з різним станом розвитку культур, що має велике значення для ефективного управління сільськогосподарськими землями. Такі підходи використовують різні операції нечіткої логіки, такі як «нечітке І», «нечітке АБО», «нечітке алгебраїчне добуток», «нечітке алгебраїчне сумування» та «нечітке гамма», для об'єднання та аналізу даних оптичних і радарних супутникових знімків сільськогосподарських угідь.

Розробка моделей прогнозування врожайності на основі нечіткої логіки враховує не тільки окремі фактори, а й їх взаємозв'язки, що дозволяє забезпечити більш точні та надійні прогнози в умовах непередбачених змін клімату та середовища. Такий підхід стає важливим інструментом для сільськогосподарських підприємств у вирішенні завдань прогнозування виробництва та забезпечення стабільності у вирощуванні сільськогосподарських культур.

Нормалізований відносний вегетативний індекс (NDVI) – один із основних показників змін рослинності. Розраховується за формулою:

$$NDVI = \frac{NIR - R}{NIR + R}, \quad (1)$$

де NIR – ближній інфрачервоний канал, R – червоний канал. Для радарних даних NDVI розраховується за формулою:

$$NDVI = \frac{VH - VV}{VH + VV}, \quad (2)$$

де VH та VV поляризації зворотного розсіювання. Діапазон значень NDVI різниться від -1 до +1. Коли рослинність має високу щільність, цей показник ближче до +1, а у разі знищення або захворювання рослинності він зменшується до 0. Значення вегетаційного індексу NDVI та показники вологості ґрунту для оптичних зображень наведені на рисунку (1).

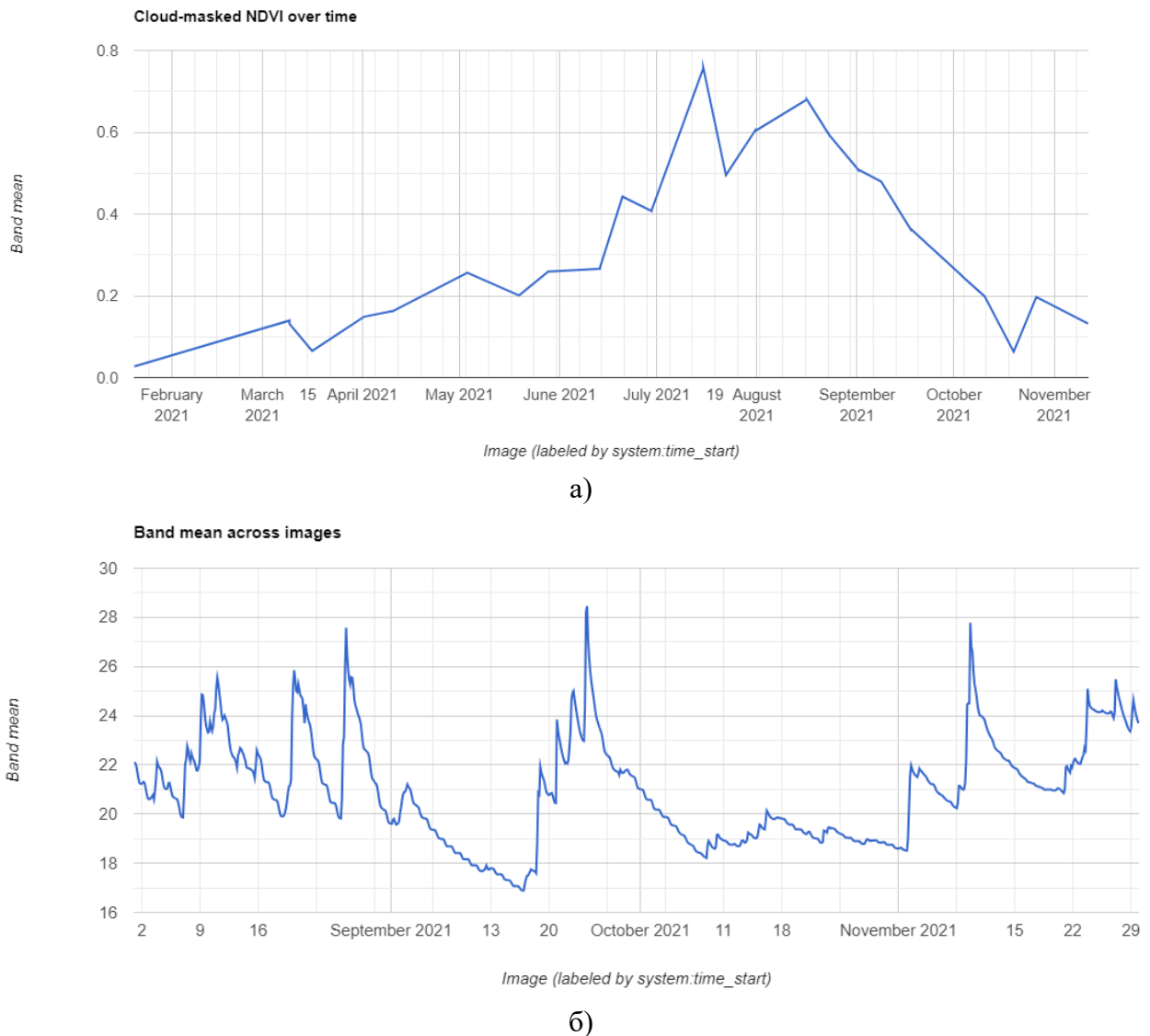


Рисунок 3 - Часові ряди показників розрахованих за оптичним супутниковим зображенням Sentinel-2: а) вегетаційного індексу NDVI; б) вологості ґрунту

У роботі розроблено інтелектуальну нечітку систему, яка заснована на точних даних про стан ґрунту і може створювати карти прогнозування стану посівів сільськогосподарських культур на визначених ділянках (Рис. 2 і 3).

Набір нечітких правил для оцінки стану посівів

Нечіткі вхідні дані			Нечіткі вихідні дані
Вологість ґрунту	Температура повітря	NDVI	Стан посівів
низька	низька	низький	низький
низька	низька	середній	низький
низька	низька	високий	нормальний
низька	середня	високий	нормальний
середня	середня	низький	нормальний
середня	середня	середній	нормальний
середня	середня	високий	високий
середня	висока	середній	низький
висока	низька	середній	нормальний
висока	низька	високий	нормальний

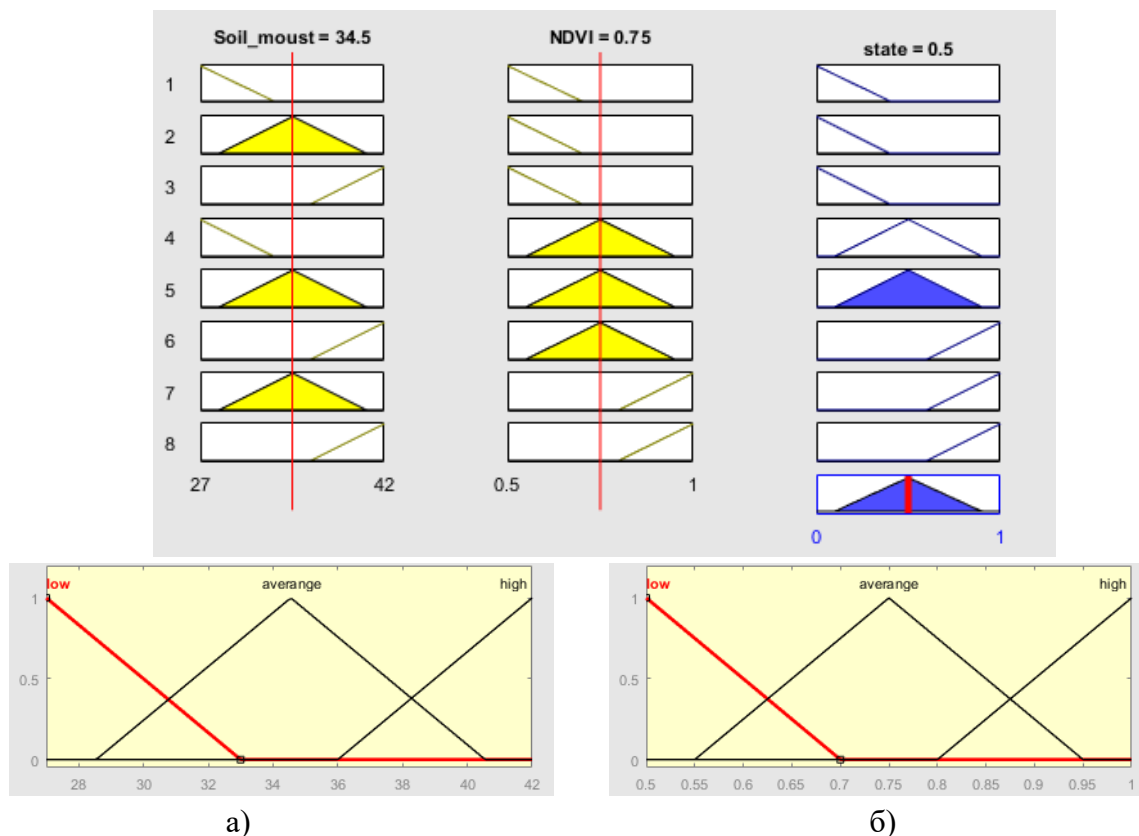


Рисунок 4 – Функції приналежності для вхідних даних:  
а) вологість ґрунту верхнього шару; б) NDVI

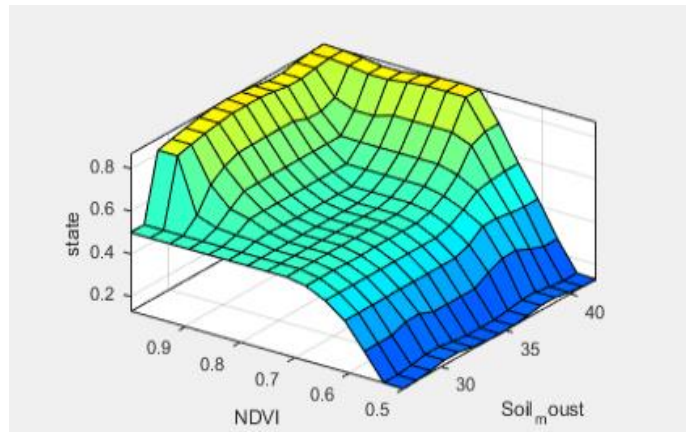


Рисунок 5 – Карта прогнозування стану посівів сільськогосподарських культур

**Висновки.** Розглянуто інформаційну технологію супутникового моніторингу розвитку сільськогосподарських рослин на основі нечіткої логіки. Запропонований підхід дозволяє моделювати складні взаємозв'язки між різними зовнішніми факторами та фізіологічними процесами самої рослини. В роботі досліджено часові ряди радарних та оптичних супутникових даних за дослідними ділянками. Оскільки досліджувались ділянки з озимими культурами, до моніторингу обирався час з пізньої осені до літа наступного року. В часовий ряд потрапили відфільтровані оптичні дані, з мінімальним покриттям хмарності за певний період. Визначено, що із залученням нечіткої логіки до супутникового моніторингу можна спрогнозувати стан та розвиток рослин сільськогосподарських культур, враховуючи погодні умови регіону і при певних відхиленнях вчасно спланувати додаткові операції на полі для поліпшення стану рослин у посівах.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. S.Yaghabi, Heidarizadi Z., Mirzapour H. "Comparing NDVI and RVI for forest density estimation and their relationships with rainfall." *Environmental Resources Research* (2019) : Vol. 7, No. 2.
2. Roberto Filgueiras. Crop NDVI Monitoring Based on Sentinel 1/Roberto Filgueiras, Everardo Chartuni Mantovani, Daniel Althoff, Elpídio Inácio Fernandes Filho, Fernando França da Cunha//*Remote Sens.* –11, 1441, 2019.
3. Dinesh Kumar. Radar Vegetation Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton/Dinesh Kumar, Srinivasa Rao and Jaswant RAJ Sharma.// *Indian Cartographer.* – Vol. XXXIII, 2013.
4. Alejandro Mestre-Quereda. Time-Series of Sentinel-1 Interferometric Coherence and Backscatter for Crop-Type Mapping/Alejandro Mestre-Quereda, Juan M. Lopez-Sanchez, Fernando Vicente-Guijalba, Alexander W. Jacob, Marcus E. Engdahl// *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* – Vol. 13, 4070 – 4084, 2020.
5. Willians Ribeiro Mendes, Fábio Meneghetti U. Araújo, Ritaban Dutta, Derek M. Heeren. "Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing." *Expert Systems With Applications* 124 (2019): 13–24.
6. Yan Wang; M. Jamshidi. "Fuzzy logic applied in remote sensing image classification" *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (2004). doi: 10.1109/ICSMC.2004.1401402.

7. Katharina Heupel, Daniel Spengler, Sibylle Itzerott. "A Progressive Crop-Type Classification Using Multitemporal Remote Sensing Data and Phenological Information" *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* volume (2018): pp. 53–69.
8. Продовольча та сільськогосподарська організація ООН (ФАО), URL: <http://www.fao.org>.
9. Olena Kavats, Volodymyr Hnatushenko, Yuliya Kibukevych, Yurii Kavats. "Flood Monitoring Using Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar Images" *CSIT2019* (2019): 046, v3.
10. Olena Kavats, Dmitriy Khramov, Kateryna Sergieieva and Volodymyr Vasyliiev Monitoring Harvesting by Time Series of Sentinel-1 SAR Data, *Remote Sens.* 2019, 11(21), 2496; <https://doi.org/10.3390/rs11212496>

#### REFERENCES

1. S.Yaghabi, Heidarizadi Z., Mirzapour H. "Comparing NDVI and RVI for forest density estimation and their relationships with rainfall." *Environmental Resources Research* (2019) : Vol. 7, No. 2.
2. Roberto Filgueiras. Crop NDVI Monitoring Based on Sentinel 1/Roberto Filgueiras, Everardo Chartuni Mantovani, Daniel Althoff, Elpídio Inácio Fernandes Filho, Fernando França da Cunha//*Remote Sens.* –11, 1441, 2019.
3. Dinesh Kumar. Radar Vegetation Index as an Alternative to NDVI for Monitoring of Soyabean and Cotton/Dinesh Kumar, Srinivasa Rao and Jaswant RAJ Sharma.// *Indian Cartographer.* – Vol. XXXIII, 2013.
4. Alejandro Mestre-Quereda. Time-Series of Sentinel-1 Interferometric Coherence and Backscatter for Crop-Type Mapping/Alejandro Mestre-Quereda, Juan M. Lopez-Sanchez, Fernando Vicente-Guijalba, Alexander W. Jacob, Marcus E. Engdahl// *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* – Vol. 13, 4070 – 4084, 2020.
5. Willians Ribeiro Mendes, Fábio Meneghetti U. Araújo, Ritaban Dutta, Derek M. Heeren. "Fuzzy control system for variable rate irrigation using remote sensing." *Expert Systems With Applications* 124 (2019): 13–24.
6. Yan Wang; M. Jamshidi. "Fuzzy logic applied in remote sensing image classification" *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics* (2004). doi: 10.1109/ICSMC.2004.1401402.
7. Katharina Heupel, Daniel Spengler, Sibylle Itzerott. "A Progressive Crop-Type Classification Using Multitemporal Remote Sensing Data and Phenological Information" *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* volume (2018): pp. 53–69.
8. Продовольча та сільськогосподарська організація ООН (ФАО), URL: <http://www.fao.org>.
9. Olena Kavats, Volodymyr Hnatushenko, Yuliya Kibukevych, Yurii Kavats. "Flood Monitoring Using Multi-Temporal Synthetic Aperture Radar Images" *CSIT2019* (2019): 046, v3.
10. Olena Kavats, Dmitriy Khramov, Kateryna Sergieieva and Volodymyr Vasyliiev Monitoring Harvesting by Time Series of Sentinel-1 SAR Data, *Remote Sens.* 2019, 11(21), 2496; <https://doi.org/10.3390/rs11212496>

Received 16.05.2024.

Accepted 22.05.2024.

#### ***Analysis of information technology of satellite monitoring of the development of agricultural crops using fuzzy logic***

*Climate change is increasingly affecting agricultural production in European countries, and modern satellite data methods offer practical solutions for monitoring the development of crops and*

*subsequently predicting their yields. Crop production, which is largely dependent on natural resources and weather conditions, constantly faces such dangerous phenomena as sharp changes in air temperature and moisture regime during the growing season, which directly affect crop productivity. The article investigates the impact of hydrothermal conditions on the development of agricultural plants using satellite monitoring. Data from Landsat-8, Sentinel-1, and Sentinel-2 satellites allow us to identify the peculiarities of plant development in crops and threats to crop productivity. Studies have confirmed that the use of fuzzy logic helps in planning and optimizing crop production in the face of climate change.*

*Keywords: satellite monitoring, Landsat-8, Sentinel-1, Sentinel-2, crop yield, fuzzy logic, radar data, crop development, weather conditions.*

**Кавац Олена Олександрівна** – к.т.н., доц., доцент кафедри інформаційних технологій і систем, Українського державного університету науки і технологій.

**Кавац Юрій Віталійович** – к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій і систем, Українського державного університету науки і технологій.

**Гирка Анатолій Дмитрович** – д.с.н., професор, головний науковий співробітник лабораторії агробіологічних ресурсів озимих та ярих зернових культур, ДУ Інститут зернових культур Національної академії аграрних наук України.

**Кібукевич Юлія Олегівна** – аспірант кафедри інформаційних технологій і систем, Українського державного університету науки і технологій.

**Kavats Olena Oleksandrivna** – Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

**Kavats Yurii Vitaliyovych** – Ph.D., Associate Professor of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

**Нирка Anatolii Dmytrovych** – doctor of agricultural sciences, professor, chief research scientist of the laboratory of agrobiological resources of winter and spring grain crops, SI Institute of Grain Crops of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine.

**Kibukevych Julia** – graduate student of the Department of Information Technology and Systems of Ukrainian State University of Science and Technology.

К.Ю. Островська, Є.В. Островський, В.В. Старик

## ТЕХНОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ НА ОСНОВІ РЕСУРСІВ ХМАРНОЇ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ПЛАТФОРМИ

*Анотація.* В результаті роботи було розроблено технологію створення цифрових двійників, а також створено прототип цифрового двійника на основі ресурсів хмарної обчислювальної платформи Microsoft Azure. Також було розроблено клієнтську програму для роботи з цифровим двійником. У ході розробки було вирішено такі завдання: проведено огляд наукової літератури та існуючих рішень Інтернету речей для створення цифрових двійників; вивчено технології, що надаються хмарними обчислювальними платформами для створення цифрових двійників; спроектовано та розроблено прототип цифрового двійника на основі хмарних обчислювальних ресурсів обчислювальної платформи Microsoft Azure; здійснено тестування розробленого прототипу.

*Ключові слова:* microsoft azure, тестування, прототип, цифровий двійник, хмарна обчислювальна платформа, арі, скбд microsoft sql server, sql-скрипт, yaml-файл, с#, http rest клієнт.

Концепцію Інтернету речей (IoT) сформульовано досить давно, проте активне наповнення концепції технологічним змістом та впровадження практичних рішень для її реалізації відбувається саме в останні роки. Дана концепція є обчислювальною мережею фізичних предметів, оснащених вбудованими технологіями для взаємодії один з одним або із зовнішнім середовищем [1]. Загальний світовий обсяг капіталовкладень у IoT у 2018 році становив 646 мільярдів доларів США. Прогноз щодо капіталовкладень у ці технології на 2022 рік – 745 мільярдів доларів США, на 2024 – понад 1 трильйон доларів [2].

Розвиток розподіленої мережної інфраструктури в автоматизованих системах управління технологічним процесом призвело до появи Промислового Інтернету речей (Industrial Internet of Things – IIoT) – концепції взаємозв'язку датчиків, приладів та інших пристроїв, об'єднаних у мережу з промисловими програмами комп'ютерів, включаючи, крім іншого, управління виробництвом та енергоспоживанням. Такий зв'язок дозволяє збирати дані пристроїв та аналізувати їх, що потенційно сприяє підвищенню продуктивності праці та ефективності виробництва, а також іншим економічних переваг [3]. Однією з переваг впровадження цього підходу є можливість створення цифрового двійника (Digital Twin) системи, що розробляється.

Цифровий двійник – це ієрархічна система математичних моделей, обчислювальних методів та програмного забезпечення, що забезпечує синхронізацію між станом реально існуючого процесу або системи та супутньою віртуальною копією [4, 5].

Завдяки розвитку хмарних технологій, з'явилася можливість створити інфраструктуру зберігання даних, здатну підтримувати Інтернет речей. Публічні хмарні платформи надають

безліч рішень для цифрового перетворення бізнесу. Гнучкість та автоматизованість отриманого середовища досягається за рахунок використання прикладних програмних інтерфейсів (API). Це дозволяє різним пристроям та системам взаємодіяти між собою, навіть якщо вони працюють на основі різних стандартів та протоколів [6].

Застосування хмарних технологій може спростити обробку надвеликих масивів даних, що генеруються пристроями Інтернету речей. Цей факт переконує необхідність вивчення інструментів хмарних платформ для розробки додатків, що обробляють дані з пристроїв IoT. Одними з можливих рішень у цій галузі є хмарні платформи Microsoft Azure [7] та Amazon Web Services [8].

Ключовою перевагою даних платформ є широкий набір інструментів, зокрема для створення рішень Інтернету речей та цифрових двійників.

Метою роботи є розробка технології створення цифрових двійників, а також реалізація та тестування прототипу цифрового двійника на основі ресурсів хмарної обчислювальної платформи.

Як джерело даних було прийнято рішення використати проект Low Carbon Project [9], що забезпечує функціонування системи смс-повідомлення клієнтів про поточну динамічну тарифну вартість електроенергії. У рамках реалізації проекту будинки-учасники були розбиті на дві тарифні групи. Перша група користувалася стандартними тарифами споживання електроенергії. Споживачам другої групи відправлялися сигнали про високу ціну енергоспоживання зниження навантаження на локальні розподільні мережі протягом періодів високої завантаженості. Вибраний набір даних є показниками енергоспоживання для вибірки з 5567 лондонських будинків, оснащених датчиками споживання енергії. Читання даних проводилося з півгодинними інтервалами. Набір даних містить споживання енергії, у кВт/год (за півгодини), унікальний ідентифікатор домогосподарства, дату та час, а також тарифну групу. Можна виділити кілька завдань, що утворюються під час аналізу цих даних:

- сегментація денного споживання енергії;
- розбивка кривого електричного навантаження;
- прогнозування споживання електроенергії будинками;
- дослідження відмінностей наслідків використання електричної та акумуляторної систем опалення;
- прогнозування споживання електроенергії у масштабі міста.

Для розробки цифрового двійника було використано частину вищеописаного набору даних [10], що є файлом формату CSV, схема якого описана в таблиці 1. Таблиця містить наступні поля: LCLid – унікальний ідентифікатор квартири; stdorToU – тарифний план квартири; DateTime – час чергового збору даних з IoT-пристрою; KWH/hh - показання IoT-пристрою, що відображають кількість спожитих кіловат електроенергії за 30 хвилин; Acomn – поточна категорія квартири за шкалою Acomn та Acomn\_grouped – статус поточного енергоспоживання за шкалою Acomn.

Схема вихідного набору даних

LCLid	stdor ToU	DateTime	KWH/h h	Acorn	Acorn_group d
MAC000002	Std	2023-10-12 00:30:00.0000000	0.143	ACORN -A	Affluent
MAC000006	ToU	2023-10-28 16:30:00.0000000	0.013	ACORN -Q	Adversity
MAC000027	Std	2023-08-13 15:00:00.0000000	0.41	ACORN -H	Comfortable
MAC000032	Std	2023-09-11 12:00:00.0000000	0.112	ACORN -J	Comfortable

На підставі аналізу існуючих технологій створення цифрових двійників на базі хмарних обчислювальних систем було зроблено висновок, що обидві розглянуті системи знаходяться в попередній стадії, тому вибір системи, що використовується, заснований на обсязі наданих можливостей, кількості супутніх хмарних інструментів і рішень, наявності обмежень використання. При порівнянні даних найкращими результатами володіє Azure Digital Twins від Microsoft.

На основі аналізу Azure Digital Twins було визначено що функції первинної обробки телеметрії будуть написані мовою програмування JavaScript. Доставка повідомлень, що містять показання пристроїв, та клієнтська програма реалізовані з використанням програмної платформи .Net Framework.

Система, що проектувалась, у найзагальнішому вигляді складається з бази даних, що зберігає загальну статистику енергоспоживання, служби Інтернету речей Digital Twins хмарної платформи Microsoft Azure, що працює за принципом Platform as a Service (PaaS), обробника телеметрії пристроїв – програми, що відповідає за збір, відправку та обробку телеметрії, а також клієнтського Web-додатка для керування цифровим двійником, що здійснює HTTP REST запити до API створеного екземпляра Digital Twins. Діаграма потоків даних проєктованої системи представлена на рисунку 1.

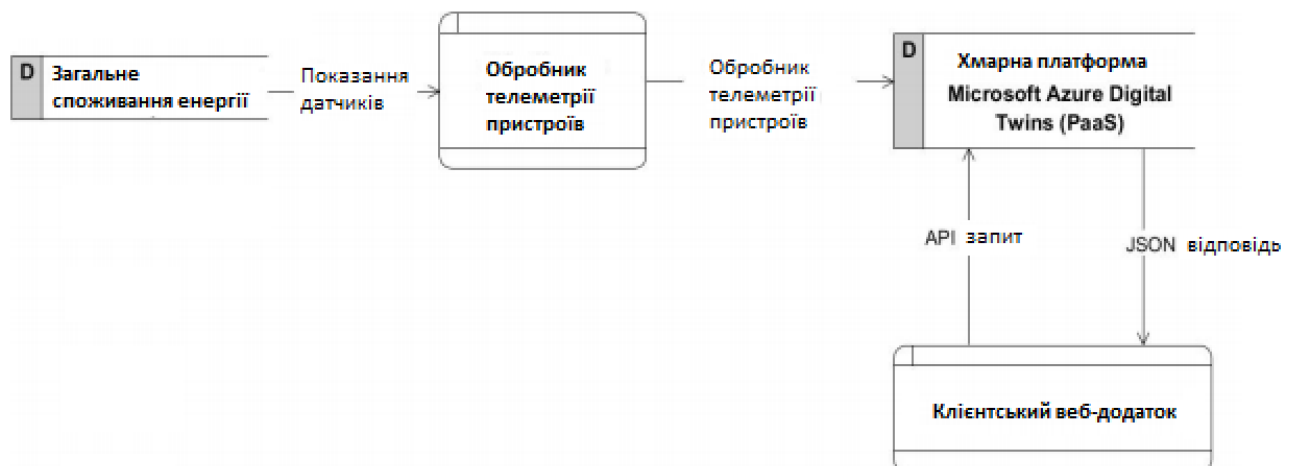


Рисунок 1 - Діаграма потоків даних проєктованого цифрового двійника

Додаток, що реалізує відправлення та обробку телеметрії, виконує обробку даних, отриманих із генератора, а також їх передачу на сервер. Воно складається з декількох компонентів: модуль створення просторового інтелектуального графа, функція обробки телеметрії, що виконує логіку користувача для даних, які надходять з пристроїв та обробника даних із сервера для визначення статусу приміщення з метою перевірки перевищення рекомендованих показників енергоспоживання для подальшого відправлення повідомлень користувачам. Клієнтська програма складається з модуля реєстрації та аутентифікації, а також генератора HTTP REST запитів до API Digital Twins. Генератор телеметрії включає базу даних «Загальне споживання енергії». Діаграму компонентів всієї системи можна побачити на рисунку 2.

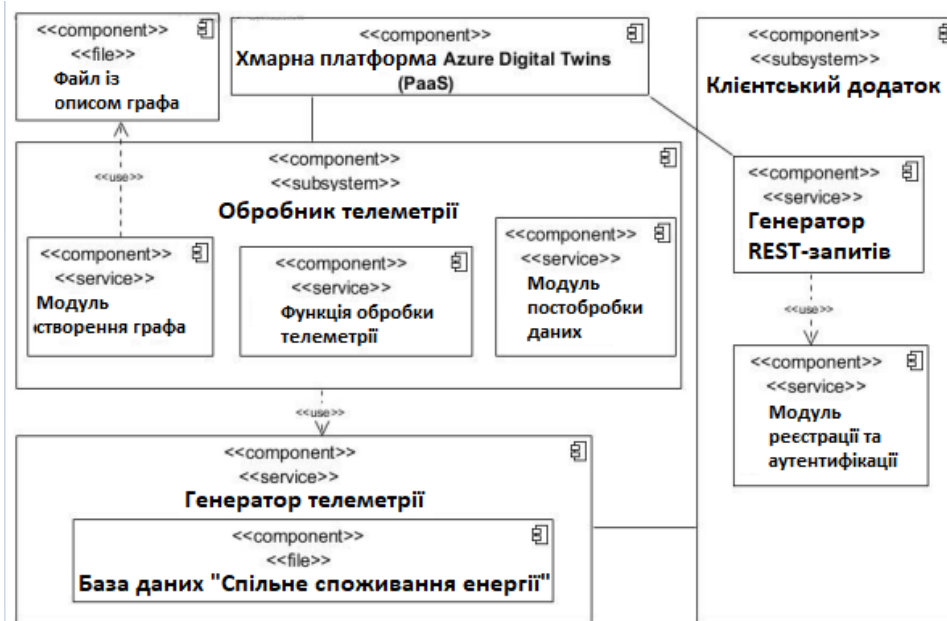


Рисунок 2 – Діаграма компонентів цифрового двійника

Як показники сенсорів використовувались дані проекту Low Carbon Project, що є файлом формату CSV, що містить 1 мільйон рядків. В результаті імпортування CSV-файлу та створення додаткових таблиць було отримано SQL-файл з усією базою.

На рисунку 3 представлена діаграма діяльності, яка покроково відображає виконання взаємодії з API Digital Twins для отримання інформації про поточне енергоспоживання.

На першому кроці користувач здійснює вхід в систему за допомогою модуля реєстрації та аутентифікації, попередньо отримавши токен авторизації за допомогою налаштованого для роботи з екземпляром Digital Twins клієнта Postman API. На цьому кроці модуль реєстрації та аутентифікації звертається до таблиці Registration для перевірки правильності даних, введених користувачем. Після цього користувач за допомогою графічного інтерфейсу клієнтської програми ініціює генерацію REST-запиту до API Azure Digital Twins, використовуючи відповідний елемент управління.

Генератор REST-запитів звертається до таблиці Spaces для отримання ідентифікатора приміщення, де потрібно визначити поточне значення енергоспоживання. Далі відбувається виконання згенерованого запиту. Після цього API Digital Twins повертає клієнтському до-

датку результат виконання запиту у вигляді JSON відповіді, з якого витягується потрібна інформація шляхом десеріалізації та виводиться користувачеві.

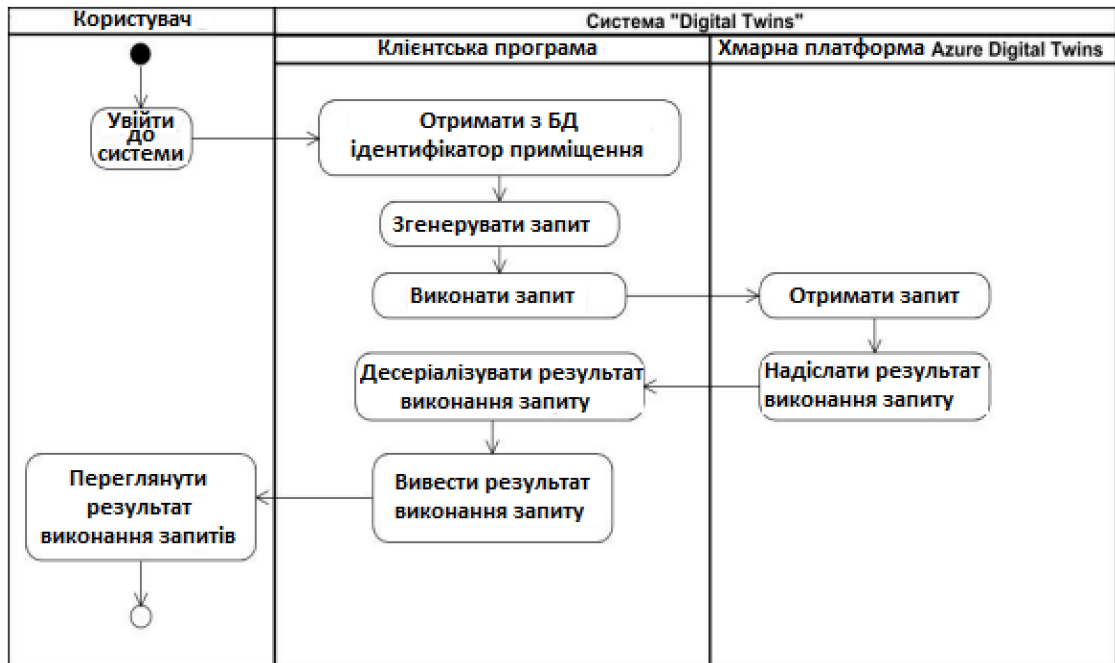


Рисунок 3 - Діаграма діяльності системи надання користувачу інформації про поточне енергоспоживання

Підготовка просторового інтелектуального графа здійснюється за допомогою файлу конфігурації формату YAML, що містить елементну структуру графа згідно з обраною онтологією.

Для системи, що розробляється, була обрана стандартна онтологія VASnet, що містить всі основні типи даних, необхідні в системі.

Фрагмент YAML-файлу конфігурації ієрархії графа представлений у лістингу 1.

Лістинг 1. Фрагмент YAML-файлу конфігурації ієрархії графа

```

- name: Quickstart Building
  type: Venue
  resources:
  - type: IoTHub
  spaces:
  - name: Floor 3
    type: Floor
    spaces:
    
```

```
- name: Focus Room 30
  type: Room
  subType: FocusRoom
  devices:
  - name: Raspberry Pi 3 30
    hardwareId: 123456789030
    sensors:
    - dataType: Light
      hardwareId: MAC000030
  matchers:
  - name: Matcher Light
    dataTypeValue: Light
  userdefinedfunctions:
  - name: Motion Processor
    matcherNames:
    - Matcher Light
    script: actions/userDefinedFunctions/availability.js
  roleassignments:
  - roleId: 98e44ad7-28d4-4007-853b-b9968ad132d1 # System Role:
    SpaceAdministrator
      objectName: Motion Processor
      objectIdType: UserDefinedFunctionId
```

Структура YAML-файлу включає декілька наступних обов'язкових розділів:

– Resources – даний вузол створює ресурс Центру Інтернету для взаємодії з пристроями. Центр Інтернету речей у кореневому вузлі графа може взаємодіяти з усіма пристроями та датчиками у графі.

– Spaces – в об'єктній моделі Digital Twins цей вузол представляє фізичні розташування. Кожен простір має тип (Type) та ім'я (Name).

– Devices – це розділ, що представляє пристрої, що керують рядом датчиків.

– Sensors – даний розділ описує використовувані датчики.

– Matchers – це розділ, що описує співставники – набори конкретних умов, які потрібно відстежувати у даних пристроїв чи датчиках. Порівняльник відстежуватиме датчик типу dataTypeValue.

Для підготовки співставника, який відстежуватиме один із цих датчиків, його значення dataTypeValue повинно відповідати dataType цього датчика.

– UserDefinedFunctions – це вузол, що описує функції первинної обробки телеметрії. Вони виконують логіку користувача для даних, що надходять з просторів і пристроїв, коли виконуються умови, зазначені співставниками.

Відповідно до розробленої схеми, була реалізована база даних для зберігання даних лічильників, а також інформації про користувача.

На рисунку 4 продемонстровано журналування повідомлень, що надсилаються до центру Інтернету речей. Кожен запис журналу містить ідентифікатор сенсора та його поточні показання, дату надсилання повідомлення, а також унікальний ідентифікатор запиту до Інтернет-центру речей.

Згідно з функціональними вимогами, система повинна сповіщати користувачів про неефективне енергоспоживання при виконанні заздалегідь визначених умов. З аналізу використовуваного набору даних було прийнято рішення встановити граничне значення ефективності енергоспоживання лише на рівні 2 кВт/ч. При перевищенні даного значення поточними показниками енергоспоживання відбувається реєстрація події про неефективність енерго-

споживання у поточному приміщенні з подальшим надсиланням до Центру подій Azure. У попередньо налаштованому Центрі подій Azure відбувається обробка подій, яка полягає у надсиланні email-повідомлень власникам приміщень та адміністратору системи за допомогою вбудованого Gmail клієнта. Приклад таких повідомлень представлено на рисунку 5.



```
Windows PowerShell
07.06.2024 15:01:42> Sending message: {"SensorValue": " 0.457 " } Properties: {
'DigitalTwins-Telemetry': '1.0', 'DigitalTwins-SensorHardwareId': 'MAC000008', 'Creation
TimeUtc': '2024-06-07T10:01:42.9895768Z', 'x-ms-client-request-id': '8450806e-4223-4c2f
-ad84-23fd4f1f4af2', }
07.06.2024 15:01:43> Sending message: {"SensorValue": " 0.186 " } Properties: {
'DigitalTwins-Telemetry': '1.0', 'DigitalTwins-SensorHardwareId': 'MAC000009', 'Creation
TimeUtc': '2024-06-07T10:01:43.0970884Z', 'x-ms-client-request-id': 'e1dac66f-e934-4baa
-9232-16c72e8e3184', }
07.06.2024 15:01:43> Sending message: {"SensorValue": " 0.28 " } Properties: {
'DigitalTwins-Telemetry': '1.0', 'DigitalTwins-SensorHardwareId': 'MAC000010', 'Creation
TimeUtc': '2024-06-07T10:01:43.3215366Z', 'x-ms-client-request-id': '701432af-6ed3-4141-
a350-e452ce052567', }
07.06.2024 15:01:43> Sending message: {"SensorValue": " 0.5 " } Properties: {
'DigitalTwins-Telemetry': '1.0', 'DigitalTwins-SensorHardwareId': 'MAC000011', 'Creation
TimeUtc': '2024-06-07T10:01:43.4253032Z', 'x-ms-client-request-id': '9e0852c1-8c98-46fd-a
9a0-5107cbea29ad', }
```

Рисунок 4 - Журнулювання відправлених до центру Інтернету речей повідомлень

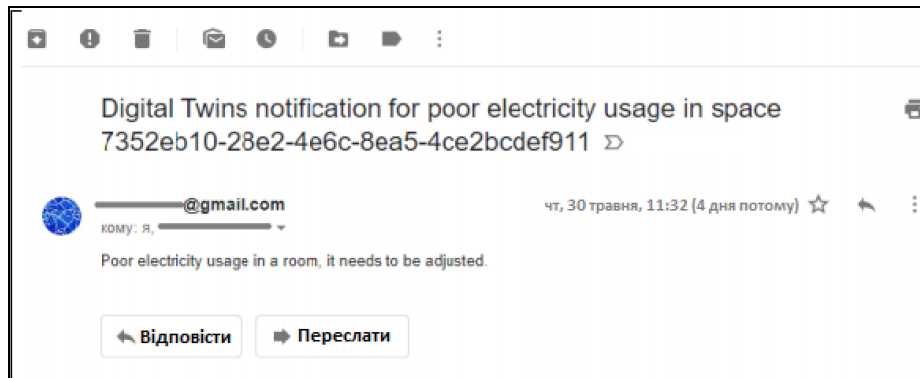


Рисунок 5 - Приклад оповіщення користувача

Тестування системи було проведено в декілька етапів: тестування працездатності системи на основі модульного тесту, що перевіряє статуси відповідей до здійснюваних до просторового графа API-запитів, порівняльне тестування з метою визначення правильності обробки телеметрії датчиків, а також тестування API управління системою, тобто правильності результатів виконання API-запитів, що виконуються системою.

Для перевірки працездатності системи було написано модульний тест, що перевіряє правильність роботи компонента, що відповідає за створення просторового інтелектуального графа на основі YAML-файлу, що містить ієрархічну структуру фізичної, що моделюється системи. Тест перевіряє статуси відповідей сервера до систем API-запитів, що здійснюються, а також обробку виняткових ситуацій.

Для перевірки правильності наданих системою поточних та добових показників було проведено порівняння наборів даних, отриманих безпосередньо з таблиці, що містить усі показання датчиків та даних, наданих користувачеві системи на запит, тобто отримані після обробки системою. Також було обчислено середні значення енергоспоживання за добу, та здійснено їх порівняння з даними добового споживання, наданими системою для відповідних

приміщень. Результат порівняльного тестування з метою визначення правильності обробки телеметрії датчиків наведено у таблиці 2.

Таблиця 2

Результат порівняння даних

Тестовий випадок	Вхідні данні	Очікуваний результат	Отриманий результат	Тест пройдений?
Отримати поточне значення сенсора «МАС000003»	-	0,452	0,452	Так
Отримати показник середнього енергоспоживання у приміщенні «МАС000012» за добу		0,335	0,335	Так

Для перевірки правильності результатів виконання API-запитів був використаний REST клієнт Postman API [11], попередньо налаштований для роботи з програмою Azure Active Directory, що надає неявний потік дозволів OAuth 2.0. POST клієнт використовувався для виконання HTTP-запитів, що містять токени до API управління екземпляра Digital Twins, а також для складання складових запитів POST в API керування. Результат тестування API керування за допомогою Postman API наведено у додатку.

Висновки. В результаті було розроблено технологію створення цифрових двійників, а також створено прототип цифрового двійника на основі ресурсів хмарної обчислювальної платформи Microsoft Azure.

Також було розроблено клієнтську програму для роботи з цифровим двійником. Спроектвано та розроблено прототип цифрового двійника на основі хмарних обчислювальних ресурсів обчислювальної платформи Microsoft Azure. Проведено тестування розробленого прототипу.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Internet of Things. Gartner IT glossary. Gartner (5 May 2012). [Електронний ресурс] URL: <https://www.gartner.com/it-glossary/internet-ofthings/> (дата звернення: 04.02.2024 ).
2. IDC Forecasts Worldwide Spending on the Internet of Things in 2024 . [Електронний ресурс] URL: <https://www.idc.com/getdoc.jsp?containerId=puaS44596319/> (дата звернення: 04.02.2024 ).
3. Boyes H., Hallaq B., Cunningham J., Watson T. Індустріальний internet things (ІІоТ): An analysis framework. // Computers in Industry, October 2018. – Vol. 101. - P. 1-12.
4. Micro-Workflows: Kafka і Kepler спрямована на підтримку Digital Twins of Industrial Processes. Radchenko G., Alaasam A., Tchernykh A. // IEEE/ACM Int. Conf. Util. Cloud Comput. - UCC '18, pp. 83-88, December 2018.
5. Підсумки Digital Twins Cloud Platform: Microservices та Computational Workflows до Uale a Smart Factory. Бородулін К., Радченко Г., Шестаков А., Соколінській Л., Тчерних А., Продан Р. // Прос. The 10th Int. Conf. Util. Cloud Comput. - UCC '17, pp. 209-210, December 2017.
6. Грінгард С. Інтернет речей: Майбутнє вже тут. - М.: Альпіна Паблішер, 2016. - 188 с.
7. Microsoft Azure Portal. [Електронний ресурс] URL: <https://portal.azure.com/> (дата звернення: 10.02.2024 ).

8. Amazon Web Services Management Console. [Електронний ресурс] URL: <https://aws.amazon.com/console/> (дата звернення: 10.02.2024 ).
9. SmartMeter Energy Consumption Data in London Households. [Електронний ресурс] URL: <https://data.london.gov.uk/dataset/smartmeter-energy-use-data-in-london-households/> (дата звернення: 27.03.2024 ).
10. Low Carbon London webpage. [Електронний ресурс] URL: [http://innovation.ukpowernetworks.co.uk/innovation/en/Projects/tier-2-projects/Low-Carbon-London-\(LCL\)/](http://innovation.ukpowernetworks.co.uk/innovation/en/Projects/tier-2-projects/Low-Carbon-London-(LCL)/) (дата звернення: 16.04.2024 ).
11. Postman API Requests. [Електронний ресурс] URL: [https://learning.getpostman.com/docs/postman/sending\\_api\\_requests/requests/](https://learning.getpostman.com/docs/postman/sending_api_requests/requests/) (дата звернення: 07.04.2024 ).

Received 24.05.2024.  
Accepted 27.05.2024.

### ***Technology of creating digital double based on cloud computing platform resources***

*As a result of the work, the technology for creating digital doubles was developed, as well as a digital double prototype was created based on the resources of the Microsoft Azure cloud computing platform. A client program for working with a digital double was also developed. In the course of development, the following tasks were solved: – a review of scientific literature and existing Internet of Things solutions for creating digital duplicates was conducted; – technologies provided by cloud computing platforms for creating digital duplicates were studied; - designed and developed a digital double prototype based on the cloud computing resources of the Microsoft Azure computing platform; - testing of the developed prototype was carried out.*

*Keywords: microsoft azure, testing, prototype, digital double, cloud computing platform, api, microsoft sql server database, sql-script, yaml-file, c#, http rest client.*

**Островська Катерина Юріївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ ПБТ УДУНТ.

**Островський Євген Вікторович** - магістр кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ ПБТ УДУНТ.

**Старика Віталія Віталійовича** - магістр кафедри Інформаційних технологій і систем ННІ ПБТ УДУНТ.

**Ostrovska Kateryna** - candidate of technical sciences, associate professor, associate professor of the Department of Information Technologies and Systems of the Institute of Scientific Research and Technology of the University of Ukrainian State of Ukraine.

**Ostrovsky Yevhen** - master of the Department of Information Technologies and Systems of the Institute of Information Technology and Technical University of Ukraine.

**Staryk Vitaly** - Master of the Department of Information Technologies and Systems of the Institute of Scientific Research and Technology of UDUNT.

## АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПОЛІВ В ОКОЛІ ВЕРШИНИ ТРІЩИНИ У П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОМУ МАТЕРІАЛІ

*Анотація.* Проводиться системне дослідження задачі плоскої деформації для п'єзоелектричного тіла з тріщиною, яке полягає в застосуванні аналітичного та чисельного методів для урахування різних геометричних характеристик, різних механічних та електричних навантажень і різних фізичних властивостей п'єзоелектричного матеріалу.

Спочатку вважається, що розмір розрахункової області набагато більший за довжину тріщини, тому область приймається нескінченно великою, і для розв'язку задачі застосовується аналітичний метод комплексних потенціалів. Формулюється задача лінійного спряження, для якої виписується точний аналітичний розв'язок. Знаходяться аналітичні формули для визначення напружень та електричного зміщення у будь-якій точці розрахункової області. Для програмної реалізації використовувався спеціально створений додаток в рамках пакету Математика.

Розв'язок цієї ж задачі проводився також методом скінченних елементів, який може бути застосованим при будь-яких співвідношеннях довжини тріщини і характерного розміру розрахункової області. Сітка скінченних елементів згущувалась при наближенні до тріщини, і особливо – до її вершин. Реалізація розробленого алгоритму проводилась у програмному середовищі ABAQUS. Для випадку тріщини, набагато меншої за розмір області, виконувалось порівняння значень напружень та електричного зміщення на продовженні тріщини і на довільно орієнтованому промені, що виходить з її вершини. У всіх випадках мало місце дуже хороша узгодженість результатів, отриманих аналітично та методом скінченних елементів. Це підтверджує коректність розроблених методик і програмних продуктів і дозволяє використовувати їх для розв'язання широкого кола задач механіки руйнування п'єзоелектричних матеріалів.

*Ключові слова:* напруження, деформація, тріщина, аналітичний розв'язок, метод скінченних елементів, система механічних та електричних навантажень.

**Постановка проблеми.** Застосування системного підходу до розв'язання задач механіки руйнування п'єзоелектричних матеріалів дозволяє враховувати різні аспекти проблеми, такі як розмір області, довжину тріщини, величину механічного та електричного навантажень, характеристики п'єзоелектрика. З урахуванням цих факторів в роботі досліджується п'єзоелектричний елемент з тріщиною. У випадку короткої тріщини і значних розмірів області використовується аналітичний підхід, а для співвимірних розмірів тріщини і області – ме-

тод скінченних елементів (МСЕ). Основна увага приділяється аналізу привершинних областей тріщини, які визначають можливість її розвитку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В сучасній мікроелектроніці широко застосовуються п'єзоелектричні матеріали. Часто в елементах конструкцій, виготовлених з таких матеріалів, можуть виникати тріщини, зокрема мікротріщини. З огляду на невеликі розміри п'єзоелектричних виробів, мікротріщини можуть суттєво знижувати міцність таких конструкцій, тому їх дослідження є важливими для практики.

Дослідженню тріщин у п'єзоелектричних матеріалах присвячена значна кількість робіт. Зокрема в роботах [1, 2] в матрично-векторній формі представлено визначальні співвідношення для таких матеріалів. В роботі [3] досліджено модель тріщини зі скінченою електричною проникністю у п'єзоелектричному матеріалі. Взаємодія тріщин у п'єзоелектричних квазікристалах вивчалась у роботі [4]. Системи тріщин у п'єзоелектромагнітних матеріалах досліджувались у статтях [5, 6] для плоского та антиплоского випадків, відповідно.

Вказані вище роботи присвячені аналітичному дослідженню тріщин у п'єзоелектричних матеріалах для випадку нескінченних областей. Але, якщо тріщина знаходиться у п'єзоелектрику скінченних розмірів, то аналітичний підхід викликає значні труднощі, і найбільш ефективним апаратом дослідження у цьому випадку є метод скінченних елементів (МСЕ). Застосування цього методу для дослідження п'єзоелектричних матеріалів з тріщинами одержало суттєвий розвиток в роботах [7, 8], а різні варіанти електричних граничних умов на тріщині в таких матеріалах були досліджені в [9, 10]. Питання визначення швидкості звільнення енергії для тріщин у п'єзоелектричних матеріалах, які грають важливу роль при застосуванні методу скінченних елементів, вивчались в статті [11].

Слід відзначити, що питання дослідження електромеханічних полів у будь якій точці околу вершини тріщини у п'єзоелектричному матеріалі досліджено недостатньо. Це питання якраз і вивчається у даній роботі аналітичним і чисельним методами.

**Мета дослідження.** Метою даної роботи є побудова аналітичних представлень для полів напружень та електричної індукції в пружному п'єзоелектричному просторі з тріщиною нормального відриву під дією системи механічних та електричних навантажень і порівняння результатів розрахунку відповідних електромеханічних факторів з розв'язком методом скінченних елементів.

#### **Викладення основного матеріалу дослідження.**

*Аналітичний метод розв'язку.* Розглядається задача плоскої деформації для п'єзоелектричного тіла, переріз якого являє собою квадрат  $-\frac{h}{2} \leq x_i \leq \frac{h}{2}$  ( $i=1, 3$ ). Вважається, що в центральній частині тіла розташована тріщина Гріфітса  $|x_1| \leq a$ ,  $x_3 = 0$ , береги якої вільні від навантажень та електроізолювані. Тіло навантажене розтягувальними зусиллями  $\sigma_{33} = \sigma$  в напрямку, нормальному до тріщини, дотичними зусиллями  $\tau_{13} = \tau$  та електричною індукцією  $D_3 = D$ .

Співвідношення для лінійного п'єзоелектричного матеріалу за відсутності об'ємних сил і вільних зарядів можна представити у вигляді [2]:

$$\Pi_{iJ} = E_{iJKl} V_{K,l} \quad (1)$$

$$\Pi_{iJ, i} = 0 \quad (2)$$

$$\text{де } V_K = \begin{cases} u_k, & K = 1,2,3 \\ \varphi, & K = 4 \end{cases}, \quad (3)$$

$$\Pi_{iJ} = \begin{cases} \sigma_{ij}, & i, J = 1,2,3 \\ D_i, & i = 1,2,3; J = 4 \end{cases}, \quad (4)$$

$$E_{iJKl} = \begin{cases} c_{ijkl}, & J, K = 1,2,3 \\ e_{lij}, & J = 1,2,3; K = 4 \\ e_{ikl}, & K = 1,2,3; J = 4 \\ -\chi_{il}, & J = K = 4 \end{cases}, \quad (5)$$

$u_k, \varphi, \sigma_{ij}$  та  $D_i$  – переміщення, електричний потенціал, напруження та електричний потік, відповідно. Крім того  $c_{ijkl}, e_{lij}$  та  $\chi_{ij}$  - модуль пружності, п'єзоелектрична проникність та діелектрична проникність, відповідно. Малі нижні індекси в (1) – (5) і далі, завжди мають діапазон від 1 до 3, великі нижні індекси знаходяться в діапазоні від 1 до 4, а в (3), (4) використовується правило сумування Ейнштейна.

Побудуємо спочатку аналітичний розв'язок в припущенні, що розмір тріщини набагато менший за розмір тіла. Тоді можна вважати, що границі області поперечного перерізу прямують до нескінченності. Для розв'язку одержаної задачі для тріщини в нескінченній площині скористаємося методом комплексних потенціалів. Застосуємо представлення:

$$\mathbf{V} = \mathbf{a} f(z),$$

де  $\mathbf{V} = \{u_1 \ u_2 \ u_3 \ \varphi\}^T$ ,  $\mathbf{a} = \{a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4\}^T$ ,  $f(z)$  – невідома функція змінної  $z = x_1 + px_3$ .

Отримано в [12], що чотири власні вектори  $\mathbf{a}_\alpha$  рівнянь (1), (2) знаходяться з системи:

$$\left[ \mathbf{Q} + p_\alpha (\mathbf{R} + \mathbf{R}^T) + p_\alpha^2 \mathbf{T} \right] \mathbf{a} = 0 \quad (6)$$

де  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{R}$  і  $\mathbf{T}$  - матриці 4x4, що визначаються таким чином:

$$Q_{jk} = E_{1jk1}, \ R_{jk} = E_{1jk3}, \ T_{jk} = E_{3jk3} \ (j, k = 1-4),$$

а власні значення  $p_\alpha$  - з наступного характеристичного рівняння восьмого порядку:

$$\det \left[ \mathbf{Q} + p(\mathbf{R} + \mathbf{R}^T) + p^2 \mathbf{T} \right] = 0.$$

Обираючи корені з додатною уявною частиною, з урахуванням (1), (2) отримуємо представлення:

$$\mathbf{V} = \mathbf{A} f(z) + \overline{\mathbf{A} f(z)} = 2 \operatorname{Re} \sum_{\alpha=1}^4 \mathbf{a}_\alpha f_\alpha(z_\alpha) \quad (7)$$

$$\mathbf{t} = \mathbf{B}\mathbf{f}'(z) + \overline{\mathbf{B}\mathbf{f}'(z)} \quad (8)$$

де  $\mathbf{t} = \{\sigma_{13} \quad \sigma_{23} \quad \sigma_{33} \quad D_3\}^T$ , риска зверху означає комплексне спряження, а  $\mathbf{B}$  – матриця 4x4 з компонентами:

$$B_{J\alpha} = (E_{3JK1} + p_\alpha E_{3JK3}) A_{K\alpha}.$$

Вектор-функція  $\mathbf{f}(z)$  визначається так:

$$\mathbf{f}(z) = \{f_1(z_1) \quad f_2(z_2) \quad f_3(z_3) \quad f_4(z_4)\},$$

$$\text{де } z_\alpha = x_1 + p_\alpha x_3, \text{ а } \mathbf{f}'(z) = \left\{ \begin{array}{cccc} \frac{df_1(z_1)}{dz_1} & \frac{df_2(z_2)}{dz_2} & \frac{df_3(z_3)}{dz_3} & \frac{df_4(z_4)}{dz_4} \end{array} \right\}.$$

На основі співвідношень (7), (8) отримано такі співвідношення для стрибка переміщень при переході через вісь  $x_1$ :

$$\langle \mathbf{V}'(x_1) \rangle = \mathbf{W}^+(x_1) - \mathbf{W}^-(x_1) \quad (9)$$

та для вектора  $\mathbf{t}$ :

$$\mathbf{t}^{(1)}(x_1, 0) = \mathbf{G}[\mathbf{W}^+(x_1) + \mathbf{W}^-(x_1)], \quad (10)$$

де:

$$\mathbf{W}(z) = \begin{cases} \mathbf{D}\mathbf{f}'^{(1)}(z) & \text{для } x_3 > 0 \\ -\overline{\mathbf{D}\mathbf{f}'^{(1)}(z)} & \text{для } x_3 < 0 \end{cases} \quad (11)$$

де  $\mathbf{G} = \mathbf{B}\mathbf{D}^{-1}$ ,  $\mathbf{D} = \mathbf{A} - \overline{\mathbf{A}\mathbf{B}^{-1}\mathbf{B}}$ ,  $\mathbf{W}^\pm(x_1) = \mathbf{W}(x_1 \pm i0)$ .

Поза тріщиною  $\mathbf{W}^+(x_1) = \mathbf{W}^-(x_1)$ , тобто для  $x_1 \notin [-a, a]$ :

$$\mathbf{t}^{(1)}(x_1, 0) = 2\mathbf{G}\mathbf{W}(x_1) \quad (12)$$

Це означає, що

$$\mathbf{W}(z)|_{z \rightarrow \infty} = \frac{1}{2}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{t}^\infty, \quad (13)$$

де  $\mathbf{t}^\infty$  відповідає вектору  $\mathbf{t}$  при  $z \rightarrow \infty$ .

Оскільки береги тріщини вільні від навантаження та електроізолювані, то  $\mathbf{t}^{(1)}(x_1, 0) = 0$  при  $x_1 \in (-a, a)$ . Тоді з (10) маємо:

$$\mathbf{W}^+(x_1) + \mathbf{W}^-(x_1) = 0 \text{ для } x_1 \in (-a, a)$$

При умові (13) ця векторна задача Рімана-Гільберта має наступний розв'язок:

$$\mathbf{W}(z) = \frac{1}{2}\mathbf{G}^{-1}\mathbf{t}^\infty \frac{z}{\sqrt{z^2 - a^2}}.$$

Підставляючи (14) в (12), одержуємо:

$$\mathbf{t}^{(1)}(x_1, 0) = \mathbf{t}^\infty \frac{x_1}{\sqrt{x_1^2 - a^2}} \text{ для } x_1 \notin [-a, a] \quad (15)$$

Знайдемо розподіл напружень та електричної індукції в околі вершини тріщини.

З рівняння (10) для  $x_3 > 0$  маємо:

$$f^{(1)}(z) = D^{-1}W(z) = RW(z). \quad (16)$$

Рівняння (8) у розгорнутому вигляді при  $x_3 > 0$  має вигляд:

$$t_n^{(1)}(x_1, x_3) = 2 \operatorname{Re} \left[ \sum_{j=1,3,4} B_{nj} f_j'(z_j) \right], \quad (17)$$

причому для випадку плоскої деформації  $n=1,3,4$ . Підставляючи (16) в останнє рівняння, отримуємо:

$$t_n^{(1)}(x_1, x_3) = 2 \operatorname{Re} \left[ \sum_{j=1,3,4} B_{nj} \sum_{k=1,3,4} R_{jk} W_k(z_j) \right] \text{ для } x_3 > 0. \quad (18)$$

За допомогою цієї формули можна визначити електро-напружений стан в будь якій точці верхньої частини тіла. Використовуючи формулу (10) для  $x_3 < 0$  і проводячи подібний аналіз, можна отримати аналогічну формулу для нижньої частини тіла.

*Чисельний аналіз.* У випадку області скінченних розмірів, застосуємо метод скінчених елементів (МСЕ). Як відомо, цей метод базується на мінімізації функціоналу Лагранжа для поля переміщень у дискретній моделі об'єкту, що вивчається. Враховуючи особливості геометрії задачі, а саме наявність в пластині тріщини, побудові сітки скінчених елементів приділялась особлива увага. Сітка має згущення елементів при наближенні до тріщини та до її вершин. Структура сітки наведена на рис. 1. Ліва частина рисунка (а) відповідає усій області, а права (б) – локальній зоні в околі вершини тріщини.

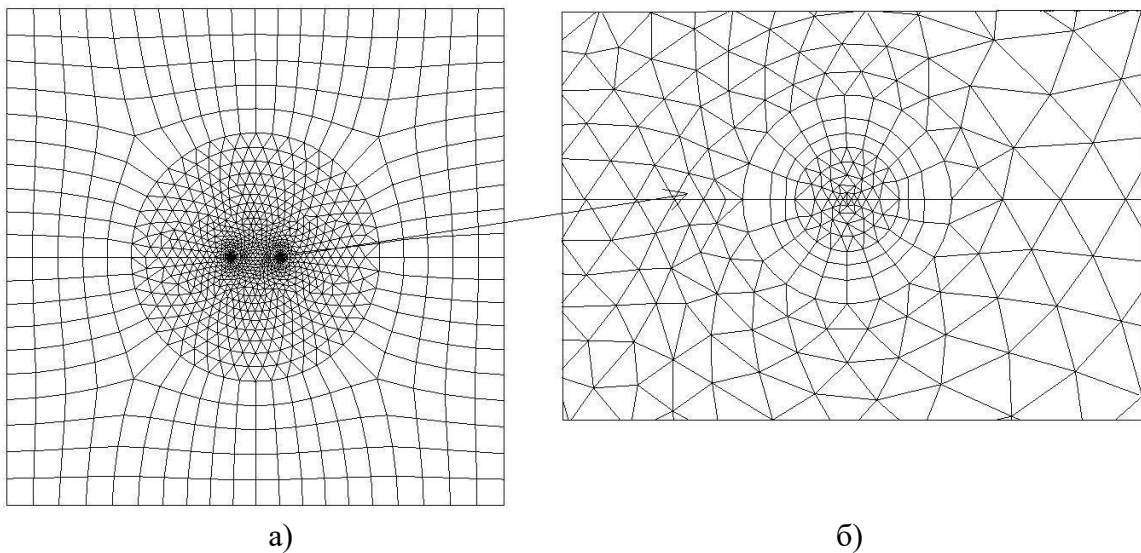


Рисунок 1 - Сітка скінчених елементів в області, що досліджується

Вважалось, що тріщина має довжину  $2a=10$  см, а п'єзоелектричний матеріал PZT-4 має такі характеристики:  $c_{11} = 139 \times 10^9$  Па,  $c_{12} = c_{13} = 74,3 \times 10^9$  Па,  $c_{33} = 113 \times 10^9$  Па,  $c_{44} = 25,6 \times 10^9$  Па,  $e_{15} = 13,4$  Кл/м<sup>2</sup>,  $e_{31} = -6,98$  Кл/м<sup>2</sup>,  $e_{33} = 13,8$  Кл/м<sup>2</sup>,

$\chi_{11} = 6 \times 10^{-9} \text{ Ф/м}$ ,  $\chi_{33} = 5,47 \times 10^{-9} \text{ Ф/м}$ . При застосуванні МСЕ вважалося, що область квадратна розміром 2x2 м. При такому співвідношенні розмірів області і довжини тріщини правомірне порівняння одержаних числових результатів з відповідними аналітичними результатами для нескінченної області.

У таблицях 1 і 2 наведено результати знаходження нормального напруження та електричного зміщення на продовженні тріщини для випадку, коли пластина навантажена зусиллями  $\sigma^\infty = 50 \text{ МПа}$  (Табл. 1) або електричною індукцією  $D_3^\infty = 0.02 \text{ Кл/м}^2$  (Табл. 2).

Таблиця 1

Значення нормального напруження  $\sigma_{33} / 10^7 \text{ Па}$  на продовженні тріщини

$x_1, \text{ см}$	5,55	6,25	7,14	8,33	10,0
МСЕ	11,509	8,3612	7,0248	6,2709	5,7928
Аналітичний	11,470	8,3333	7,0014	6,2500	5,7735

Таблиця 2

Значення електричного зміщення  $100 \times D_3 \text{ Кл/м}^2$  на продовженні тріщини

$x_1, \text{ см}$	5,26	5,88	6,66	7,69	9,091
МСЕ	6,408	3,798	3,025	2,633	2,396
Аналітичний	6,404	3,796	3,023	2,631	2,394

За допомогою формул (18) точні значення напружень можна отримати у будь-якій точці околу вершини тріщини. Для ілюстрації цієї можливості в Табл. 3 наведено значення нормального напруження  $\sigma_{33}$  і електричного зміщення  $D_3$  у точках, які розташовані вздовж променя, що виходить з вершини тріщини під кутом  $30^\circ$  на різних відстанях  $l$  від вершини. Зовнішні навантаження вибирались рівними  $\sigma^\infty = 50 \text{ МПа}$ ,  $D_3^\infty = 0.05 \text{ Кл/м}^2$ . Для порівняння наведено також відповідні значення цих же величин, які отримані МСЕ.

Таблиця 3

Значення електромеханічних факторів в околі вершини тріщини

$l, \text{ см}$	Аналітичний		МСЕ	
	$\sigma_{33} / 10^7 \text{ Па}$	$100 \times D_3 \text{ Кл/м}^2$	$\sigma_{33} / 10^7 \text{ Па}$	$100 \times D_3 \text{ Кл/м}^2$
0,5	14,32	11,73	14,09	11,92
1,0	10,16	9,54	10,02	9,69
1.5	9,82	8,93	9,78	9,01
2,0	9,68	8,13	9,66	8,21

З одержаних результатів видно, що хороша узгодженість аналітичних результатів з відповідними результатами розрахунків по МСЕ має місце практично для всіх точок області. Деяка відмінність в результатах для  $\sigma_{33}$  і  $D_3$  спостерігається для точок, які знаходяться безпосередньо біля вершини. Для інших навантажень та інших точок околу вершини тріщини має місце аналогічна узгодженість аналітичних та чисельних результатів. Це підтверджує як

правильність отриманих формул (18), так і коректність розрахунків методом скінченних елементів.

**Висновки.** З використанням методу комплексних потенціалів побудовано аналітичні вирази (18) для визначення розподілу дотичних і нормальних напружень, а також електричної індукції в будь-якій точці п'єзоелектричного тіла з тріщиною. Розрахунки полів вказаних величин за цими формулами порівняно з чисельними результатами, отриманими за допомогою методу скінченних елементів для тіла скінченних розмірів при умові, що тріщина набагато коротша за розмір тіла. Для різних систем напружень та електричного зміщення наведено розподіли шуканих величин на продовженні тріщини та на довільно орієнтованому відрітку, що виходять з її вершини. Показано, що вказані два методи дають результати, добре узгоджені між собою, що підтверджує коректність аналітичної і чисельної методик, розвинутих в роботі.

### ЛІТЕРАТУРА

1. Механика связанных полей в элементах конструкций. Т.5. Электроупругость / Гринченко В. Т., Улитко А. Ф., Шульга Н. А.; Отв. ред. А. Н. Гузь; АН УССР. Ин-т механики. – Киев: Наук. думка, 1989. – 280 с.
2. Pak Y.E. Linear electro-elastic fracture mechanics of piezoelectric materials. *Int. J. of Fracture*. 1992. 54, 79–100.
3. Govorukha V., Sheveleva A., Kamlah M. A crack along a part of an interface electrode in a piezoelectric bimaterial under anti-plane mechanical and in-plane electric loadings. *Acta Mech*. 2019. 230(6), P. 1999–2012. <https://doi.org/10.1007/s00707-019-2364-y>.
4. Hu K. Q., Gao C.-F., Zhong Z., Chen Z. T. Interaction of collinear interface cracks between dissimilar one-dimensional hexagonal piezoelectric quasicrystals. *ZAMM*. 2021. e202000360. <https://doi.org/10.1002/zamm.202000360>.
5. Shevelova N., Khodanen T., Chapelle F., Lapusta Y., Loboda V. A set of collinear electrically charged interfacial cracks in magneto-electroelastic bimaterial. *Acta Mech*. 2023. 234. P. 4899–4915. <https://doi.org/10.1007/s00707-023-03642-y>.
6. Verma P. R. Magnetic-yielding zone model for assessment of two mode-III semi-permeable collinear cracks in piezo-electro-magnetic strip. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*. 2022. 29. P. 1529-1542.
7. Kuna M. Finite element analyses of cracks in piezoelectric structures. *Key Engineering Materials*. 2007. 348-349. P. 629–632. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.348-349.629>.
8. Kuna M., Rao B. N. Interaction integrals for fracture analysis of functionally graded piezoelectric materials. *Int. J. of Solids and Struct*. 2008. 45. P. 5237–5257. <https://doi.org/10.1115/PVP2008-61875>.
9. Adlucky V. J., Levchenko M. S., Loboda V. V. Finite-element analysis of the parameters of fracture in a piezoelectric bimaterial with interface crack for various types of boundary conditions on its faces. *J.Math. Sci*. 2024. 279, No. 2. P.181–196. <https://doi.org/10.1007/s10958-024-07004-4>.
10. Levchenko M. S., Lapusta Y. M., Loboda V. V. On the method of simulating a crack filler between two piezoelectric materials. *Проблеми обчислювальної механіки та міцності конструкцій*

(Problems of Computational Mechanics and Strength of Structures). 2023. 37. С. 94–104. (vol. 37. P. 94–104).

11. McMeeking R. M. The energy release rate for a Griffith crack in a piezoelectric material. *Eng. Fract. Mech.* 2004. 71. P. 1149–1163. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(03\)00135-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(03)00135-8).

12. Soh A.K., Liu J., Fang D. Explicit expressions of the generalized Barnett-Lothe tensors of anisotropic piezoelectric materials. *Int. J. of Engineering Science.* 2001. 39. P. 1803-1814.

#### REFERENCES

1. Mechanics of coupled fields in structural elements. V.5. Electro-elasticity / Grinchenko V. T., Ulitko A. F., Shulga N. A.; Rep. ed. A. N. Guz; Academy of Sciences of Ukrainian SSR. Institute of Mechanics. – Kyiv: Nauk. Dumka, 1989. – 280 p.

2. Pak Y. E. Linear electro-elastic fracture mechanics of piezoelectric materials. *Int. J. of Fracture.* 1992. 54, 79–100.

3. Govorukha V., Sheveleva A., Kamlah M. A crack along a part of an interface electrode in a piezoelectric bimaterial under anti-plane mechanical and in-plane electric loadings. *Acta Mech.* 2019. 230(6), P. 1999–2012. <https://doi.org/10.1007/s00707-019-2364-y>.

4. Hu K. Q., Gao C.-F., Zhong Z., Chen Z. T. Interaction of collinear interface cracks between dissimilar one-dimensional hexagonal piezoelectric quasicrystals. *ZAMM.* 2021. e202000360. <https://doi.org/10.1002/zamm.202000360>.

5. Shevelova N., Khodanen T., Chapelle F., Lapusta Y., Loboda V. A set of collinear electrically charged interfacial cracks in magneto-electro-elastic bimaterial. *Acta Mech.* 2023. 234. P. 4899–4915. <https://doi.org/10.1007/s00707-023-03642-y>.

6. Verma P. R. Magnetic-yielding zone model for assessment of two mode-III semi-permeable collinear cracks in piezo-electro-magnetic strip. *Mechanics of Advanced Materials and Structures.* 2022. 29. P. 1529-1542.

7. Kuna M. Finite element analyses of cracks in piezoelectric structures. *Key Engineering Materials.* 2007. 348-349. P. 629–632. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.348-349.629>.

8. Kuna M., Rao B. N. Interaction integrals for fracture analysis of functionally graded piezoelectric materials. *Int. J. of Solids and Struct.* 2008. 45. P. 5237–5257. <https://doi.org/10.1115/PVP2008-61875>.

9. Adlucky V. J., Levchenko M. S., Loboda V. V. Finite-element analysis of the parameters of fracture in a piezoelectric bimaterial with interface crack for various types of boundary conditions on its faces. *J. Math. Sci.* 2024. 279, No. 2. P.181–196. <https://doi.org/10.1007/s10958-024-07004-4>.

10. Levchenko M. S., Lapusta Y. M., Loboda V. V. On the method of simulating a crack filler between two piezoelectric materials. *Проблеми обчислювальної механіки та міцності конструкцій (Problems of Computational Mechanics and Strength of Structures).* 2023. 37. С. 94–104. (vol. 37. P. 94–104).

11. McMeeking R. M. The energy release rate for a Griffith crack in a piezoelectric material. *Eng. Fract. Mech.* 2004. 71. P. 1149–1163. [https://doi.org/10.1016/S0013-7944\(03\)00135-8](https://doi.org/10.1016/S0013-7944(03)00135-8).

12. Soh A. K., Liu J., Fang D. Explicit expressions of the generalized Barnett-Lothe tensors of anisotropic piezoelectric materials. *Int. J. of Engineering Science.* 2001. 39. P. 1803-1814.

Received 24.05.2024.  
Accepted 27.05.2024.

«Системні технології» 5 (154) 2024 «System technologies»  
***Analysis of electromechanical fields around the tip of a crack  
in a piezoelectric material***

*A systematic study of the problem of plane deformation for a piezoelectric body with a crack is carried out. It consists in the application of analytical and numerical methods for taking into account various geometric characteristics, various mechanical and electrical loads, and various physical properties of the piezoelectric material.*

*Initially, it is assumed that the size of the considered body is much larger than the length of the crack, so the area is assumed to be infinitely large, and the analytical method of complex potentials is used to solve the problem. The electromechanical characteristics are presented through a piecewise analytical vector function. Using these representations, the problem of linear relationship is formulated and an exact analytical solution of this problem is given. Based on this solution, the analytical formulas for determining the stresses and electrical displacement at any point of the body are obtained. For their implementation, a special software application in the framework of the Mathematics package was created.*

*The solution of the same problem was also carried out using the finite elements method, which can be applied for any ratio of the length of the crack and the characteristic size of the body. Taking into account the specifics of the geometry of the problem, namely the presence of a crack, the finite elements mesh was refined approaching the crack and especially its tips. The implementation of the developed algorithm was carried out in the ABAQUS software environment. Different ratios of the body and the crack length sizes were analyzed. In order to be able to compare the analytical and numerical results, a special analysis was performed for the case of a crack much smaller than the body size. A system analysis was carried out, which included a purely mechanical load, a purely electrical one, as well as their combination. A comparison of the stresses and electrical displacement values were performed on the crack continuation and on an arbitrarily oriented direction emanating from its tip. In all cases a very good agreement between the results obtained analytically and by the finite element method were found out. This confirms the correctness of the developed methods and software products and allows to use them for the solution of various problems of fracture mechanics of piezoelectric materials.*

*Keywords: stress, deformation, crack, analytical solution, finite element method, system of mechanical and electrical loads.*

**Ходанен Тетяна Володимирівна** – к.ф.м.н., доцент, доцент кафедри теоретичної та комп'ютерної механіки, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9194-3634>

**Лобода Кирило Володимирович** - старший інженер ТОВ «Аква-Хім», Дніпро.

**Tetyana Khodanen** – Ph.D., Associate Professor, Associate Professor of the Department of Theoretical and Computational Mechanics, Oles Honchar Dnipro National University, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9194-3634>

**Kyrylo Loboda** - senior engineer of Aqua-Chem LLC, Dnipro.

Bondar Oleh, Nikolenko Anatolii, Kovalenko Viktor, Kitaev Oleh,  
Stepanenko Oleh, Siversky Serhii, Sprysa Vasyl

**PRINCIPLES OF CONSTRUCTING EQUIVALENT CIRCUITS  
FOR NONLINEAR ELECTROCHEMICAL ELEMENTS:  
ANALYSIS AND EXPERIMENTAL PARAMETER DETERMINATION**

*Annotation. The paper proposes a generalized scheme for replacing the electrolyzer for the deposition of metal coatings. As nonlinear elements of the specified scheme, the dependences of the partial currents of metal dissolution and deposition on the near-anode or near-cathode voltage drop are considered, respectively. The possibility of applying certain simplifications in the general scheme, depending on the peculiarities of the deposition process of one or another metal, was also analyzed.*

*At the same time, the general structure of approximating expressions is proposed and the approximation coefficients for individual nonlinear electrochemical elements are determined. The specified expressions differ from the previously known ones in that their structure is suitable for obtaining the general regularities of electromagnetic processes that take place in systems of pulse electrodeposition of metals in an explicit form.*

*Key words: pulse electrolysis, nonlinear circuits, electrochemical elements, cathode polarization, deposition current, analytical approximation, cubic polynomial.*

### **Introduction**

The analysis of nonlinear electrical circuits is one of the most complex and critically important tasks in modern electrical engineering and electronics. Unlike linear circuits, where the relationship between current and voltage is described by linear differential equations, nonlinear circuits are characterized by much more complex dependencies. These dependencies can be exponential, power-law, logarithmic, or of other types, complicating their analytical solutions and requiring the use of numerical methods and computer modeling.

Nonlinear components, such as diodes, transistors, thyristors, as well as various electrochemical components (batteries, supercapacitors), are widely used in modern electronic devices and energy systems. For example, batteries, which are typical nonlinear elements, have complex dependencies of internal resistance and voltage on the state of charge and temperature. This makes their modeling and analysis crucial for the development of efficient energy storage and management systems.

One of the main problems in analyzing nonlinear electrical circuits is the absence of universal solution methods. Each nonlinear system requires an individual approach that considers its specifics and operating conditions. To address this problem, various methods are employed: analytical, nu-

merical, graphical, and combined. Each of these methods has its advantages and disadvantages, and the choice of method depends on the specific task.

Analytical methods, such as the Volterra method or perturbation method, allow obtaining exact solutions but are effective only for certain types of nonlinearities and usually require significant simplifications. Numerical methods, such as the Newton-Raphson method or finite difference method, are more universal and can be applied to a wide range of nonlinear problems, but they demand significant computational resources. Graphical methods, such as phase diagram analysis, enable visualizing the system's behavior but do not always provide quantitative results.

Besides analysis methods, an important aspect is the construction of adequate models of nonlinear elements. For this, various approaches are used: physical modeling, empirical models, as well as machine learning methods, which allow building models based on large volumes of data.

Thus, the problems of analyzing nonlinear electrical circuits are multifaceted and require a comprehensive approach that combines theoretical knowledge, experimental data, and modern computational methods. Solving these problems is key to developing new technologies and improving the efficiency of existing systems.

### **1. Analysis of the features and construction of equivalent circuits with nonlinear electrochemical elements**

As noted in [1], the first problem that arises in the analysis of nonlinear electrical circuits is the adequate description of the system being studied. That is, it is necessary to construct an adequate equivalent circuit, determine its parameters, and choose the characteristics of the nonlinear elements. This fully applies to electrochemical circuits as well. Therefore, it is advisable first to focus on the specific features inherent to these circuits, to note which phenomena and under what conditions are taken into account, and also how this determines the equivalent circuit.

In electrical engineering, electrical circuits containing only electronic conductors, i.e., conductors of the first kind, which are metals or semiconductors, are predominantly considered. The former, as is well known, have a specific electrical conductivity of more than 107 S/m, while the latter have a conductivity ranging from 10<sup>-8</sup> to 10<sup>6</sup> S/m. In contrast, an electrochemical circuit is understood as a circuit that contains at least one ionic conductor (a conductor of the second kind). An ionic conductor is an aqueous solution of one or more electrolytes, which can be salts, acids, or bases. This conductor contains positively MZ<sup>+</sup> and negatively MZ<sup>-</sup> charged metal ions. A characteristic feature of ionic conductors is the ability to vary their specific electrical conductivity over a wide range from 5·10<sup>-6</sup> S/m (pure water) to 80 S/m (a concentrated solution of a strong acid) by changing the concentration of the electrolyte [2].

Metal immersed into an electrolyte is called an electrode. The electrode from which current conventionally enters the electrolyte is called an anode, and the one from which it enters from the electrolyte is called a cathode (see Fig. 1). The anode can be either soluble or insoluble. Therefore, the current passes through the following path: external circuit – anode – electrolyte – cathode and returns to the external circuit. A structurally designed electrochemical circuit is called an electrochemical (galvanic) cell. In the case where processes in this cell occur with the release of electrical energy into the external circuit, the cell is called a chemical power source or galvanic cell. If the processes in the cell are accompanied by energy absorption from an external source, the cell is

called an electrolytic bath or electrolyzer. In practice, electrolyzers are widely used for electrolytic deposition of metals and alloys, metal refining, as well as in chemistry. Electromagnetic processes in circuits with electrolyzers are distinguished for electroplating metals in stationary and pulse electrolysis modes. In the stationary mode, the applied input voltage or current is constant, while in the non-stationary mode, they are non-sinusoidal.

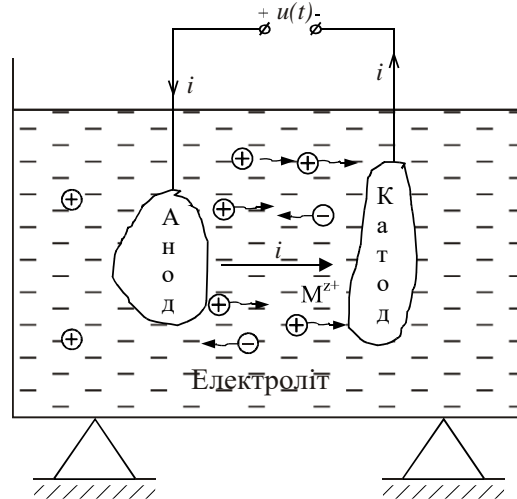


Figure 1 - Scheme of an electrochemical cell

When the voltage  $u(t)$  is applied to the electrolyzer (Fig. 1), the discharge of  $MZ^+$  cations to the metal coating  $M$  occurs at the cathode according to the reaction:



where  $\bar{e}$  is the charge of the electron;  $z$  is the valency of the metal.

Simultaneously, the anode dissolves (if it is soluble) according to the reaction:



resulting in the replenishment of the electrolyte solution with  $MZ^+$  cations, which diffuse to the cathode and discharge on its surface according to reaction (1).

During the current flow through the circuit (Fig. 1) and at the interphase boundaries of the anode-electrolyte and electrolyte-cathode, electrode potential drops  $u_k$  and  $u_a$  arise, which in electrochemistry are respectively called anodic and cathodic polarizations. If the anode is insoluble, then  $u_a = 0$ .

In addition to the main "working" reactions (1) and (2), to which portions of the current  $i(t)$  are expended, denoted respectively as  $i_a$  and  $i_k$ , accumulation and retention of electric charges occur at the interfacial electrode boundaries, forming their double layer. Thus, the interphase boundary between the electrode and the electrolyte can be represented (replaced) by a nonlinear resistive element NR, which is equivalent to one of the reactions (1) or (2) with currents  $i_a$  or  $i_k$ , and a capacitance element  $C$  connected in parallel to it with a current  $i$  (Fig. 2). Moreover, as demonstrated by the practice of electrochemical research, the dependencies  $u_a(i_a)$ ,  $u_k(i_k)$ , i.e., the volt-ampere characteristics (VAC) of these resistors are nonlinear. Classical analytical expressions for them are provided in [2 – 4]. These expressions are determined by the features of the processes occurring in the electrolyzer (electrolysis processes), namely the main stage of the process. For example, if the main (slow) stage of the process at the cathode is reaction (1), i.e., the so-called activation polariza-

tion of the cathode occurs [2 – 4], then the VAC of the nonlinear resistor are described by the expression:

$$i_{\kappa}(u_{\kappa}) = j_0 S_{\kappa} \exp\left(-\alpha \frac{z \cdot F}{R \cdot T} u_{\kappa}\right), \quad (3)$$

where  $j_0$  is the so-called partial current density of metal ion discharge;  $S_{\kappa}$  is the cathode area;  $\alpha$  is the so-called transfer coefficient of the cathodic reaction;  $z$  is the valency of the metal;  $F$  is Faraday's constant;  $R$  is the universal gas constant;  $T$  is the temperature of the cathode.

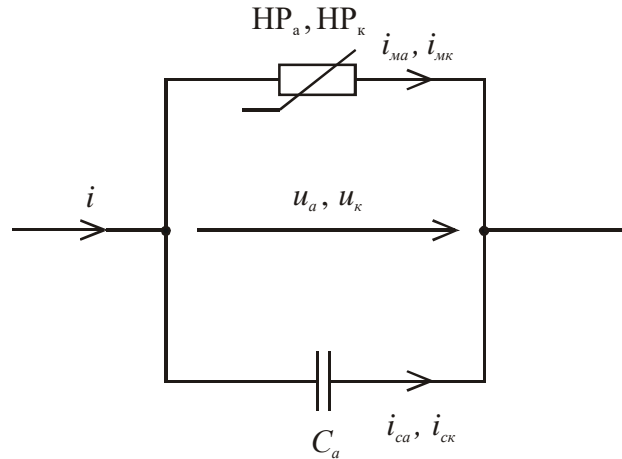


Figure 2 - Electrical equivalent circuit of an electrode

If the slow stage of the cathodic process is the diffusion of cations to the cathode (Fig. 1), i.e., the so-called concentration polarization occurs, then the volt-ampere characteristics (VAC) have an analytical form

$$u_{\kappa}(i_{\kappa}) = \frac{R \cdot T}{z \cdot F} \ln\left(1 - \frac{i_{\kappa}}{i_{diff}}\right), \quad (4)$$

where  $i_{diff}$  is the so-called limiting diffusion current of the cathode.

If the deceleration stage (1) is overlapped by the deceleration of cation diffusion to the cathode, the analytical expression of the I-V characteristic is described as follows:

$$i_{\kappa}(u_{\kappa}) = j_0 S_{\kappa} \left[ \left(1 - \frac{i_{\kappa}}{i_{zp}}\right) \exp\left(-\alpha \frac{z \cdot F}{R \cdot T} u_{\kappa}\right) \right] \quad (5)$$

In a number of electrolysis processes, the adsorption of various substances present in the electrolyte on the cathode surface is decisive. In this case, the I-V characteristic of the nonlinear resistive element in Figure 2 has an N-shaped appearance (Figure 3).

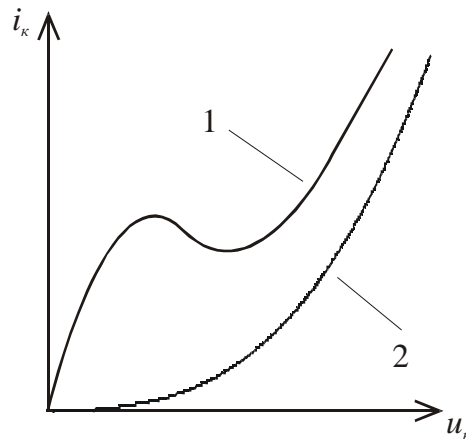


Figure 3 - Qualitative view of the I-V characteristic at the cathode-electrolyte interface in the presence of surfactants in the electrolyte (1) and in their absence (2)

In practical tasks involving the analysis of nonlinear electrochemical circuits—electrolyzers—the main quantity of interest is the cathodic voltage drop  $u_k$  or  $u_k(t)$  or its amplitude, which determines the quality of the deposited electroplating. Another important quantity is the current  $ik(t)$  and its average value, which is directly proportional to the process rate (according to Faraday's law) and thus to the rate of the coating deposition.

Another process occurring at the cathode is hydrogen evolution, which also consumes part of the total current. This process is represented in the equivalent circuit by adding another nonlinear resistor to the section that represents the cathode (Fig. 2). The characteristic of this resistor is described by the expression [4]

$$i_H(u_k) = j_{0H} S_k \exp\left(-\alpha_H \frac{z \cdot F}{R \cdot T} u_k\right), \quad (6)$$

where  $j_{0H}$  is the partial current density of hydrogen ion discharge;  $\alpha_H$  is the transfer coefficient of the hydrogen ion discharge reaction.

At the same time, in the general case, two reactions occur at the anode [3]: dissolution of the anode metal and charge concentration around it. Therefore, its equivalent circuit can also be represented as in Fig. 2. The I-V characteristic of the nonlinear resistor in this case is described by a formula similar to (3), with a different transfer coefficient.

As mentioned earlier, the specific active conductivity of the electrolyte can vary widely, but in any case, it is a finite value. This means that there will be thermal energy losses in the electrolyte, which is represented in the equivalent circuit by the presence of an active resistance  $RR$ . Additionally, if an alternating current flows through the electrolyte, it will create a varying magnetic field, implying that the electrolyte (as a large conductive medium) possesses inductance  $L$ .

Therefore, summarizing the above, the overall schematic of the electrolyzer is shown in Fig. 4.

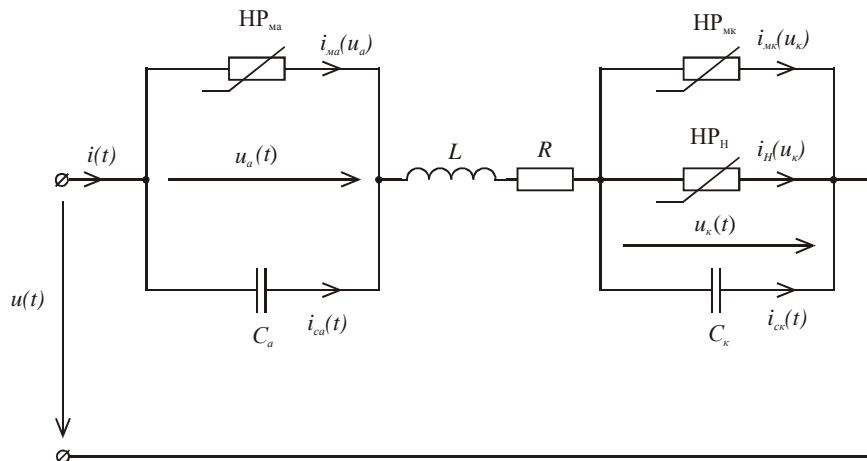


Figure 4 - General electrical equivalent circuit of the processes involved in electrochemical metal deposition (electrolyzer deposition)

Below (Table 1) is presented the correspondence between the processes in the deposition electrolyzer and the electrical elements that represent them.

Table 1

Correlation between phenomena in the electrolyzer and the elements of the equivalent circuit

Physical Phenomenon	Equivalent Circuit Element
Discharge of metal ions being deposited on the cathode	Nonlinear resistor, $NR_{mk}$
Accumulation of electric charges near the cathode surface	Capacitance, $C_k$
Hydrogen evolution at the cathode	Nonlinear resistor, $NR_H$
Dissolution of the anode metal	Nonlinear resistor, $NR_{ma}$
Accumulation of charges near the anode surface	Capacitance, $C_a$
Thermal losses in the electrolyte	Linear resistor, $R$
Creation of a magnetic field in the electrolyte by the current flowing through it	Inductance, $LL$

From the perspective of theoretical electrical engineering, the circuit in Fig. 4 represents a circuit with nonlinear electrochemical elements. Since it contains three energy-storing elements, the processes within it need to be described by a system of nonlinear differential equations, which can be reduced to a nonlinear third-order differential equation. At the same time, in practice, it is not always necessary to consider all these phenomena. As a rule, researchers analyze second-order electrochemical circuits [5–7], neglecting certain phenomena. In this work, we also consider circuits with nonlinear electrochemical elements that can be adequately described by nonlinear second-order differential equations. However, unlike previous works, the aim here is to obtain a general solution.

We will analyze possible simplifications, starting with the equivalent circuits of the cathode and anode. Metal deposition on the cathode is the "working" process of the electrolyzer, so it cannot be neglected under any circumstances. However, the concurrent hydrogen evolution does not always occur—an example is copper electroplating. In this case, the corresponding nonlinear resistor will be absent. Depending on the material used, the anode may be insoluble or non-polarizable, or

both. Assuming the anode is insoluble allows the exclusion of the corresponding nonlinear resistor from its equivalent circuit. Non-polarizability of the anode reduces the order of the differential equation describing the circuit's state to the second order, as the capacitance  $C_a$  is not considered. In practice, non-polarizable anodes, such as platinum, are usually used under laboratory conditions.

Another simplification widely used by researchers [5–7] is neglecting the inductance of the electrolyte. Thus, the processes in the electrochemical circuit are also described by a second-order differential equation. However, in certain cases, such as deposition with rectangular pulses, the inductances of the power supply, the electroplating bath, and the connecting wires have a significant negative impact on the metal deposition process. For instance, in [8], the authors note the "slumping" of the leading edge of current pulses, thereby reducing its peak density while maintaining the same pulse length in the nickel plating electrolyzer. Ultimately, this necessitates loading the electrolyzer to only 30–35% of the normal level. The same work also suggests ways to mitigate this impact, such as using capacitor power supplies for electroplating baths. However, it is impossible to completely eliminate the bath's inherent inductance, so it needs to be considered. In general, calculating this inductance is a complex task involving the computation of the bath's electromagnetic field. Nevertheless, for the reasons mentioned above, a simplified method is needed to estimate the inductance of the electrolyzer. To estimate the inductance of the electroplating bath with electrolyte, we will consider it as a straight conductor of rectangular cross-section and limited length (Fig. 5).

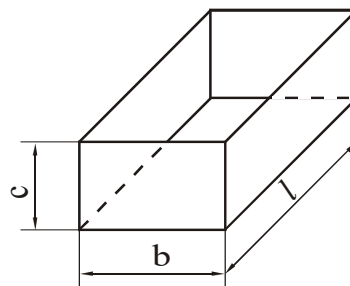


Figure 5 - General view of the electroplating bath for determining the inductance of its electrolyte

Then, according to [9-11], its inductance under the influence of direct current and low frequencies is equal to

$$L_1 = \frac{\mu_0 \ell}{2 \cdot \pi} \left( \ln \frac{2\ell}{b+c} + \frac{1}{2} \right), \quad (7)$$

where  $\ell$  is the length of the bath;  $b$  and  $c$  are the width and height, respectively;  $\mu_0$  is the magnetic constant.

If it is necessary to account for the uneven current distribution across the bath's cross-section, then the inductance obtained from formula (7) should be increased by

$$\Delta L = -\frac{\mu_0 \ell}{2 \cdot \pi} \cdot \frac{x^4}{24} \cdot f(\varepsilon), \quad (8)$$

where  $x = 0,2 \cdot k \cdot c$ ,  $k = \sqrt{\omega \cdot \mu_0 \cdot \gamma}$ ,  $\varepsilon = \frac{c-b}{c+b}$ ;

$$f(\varepsilon) = \frac{(1-\varepsilon)^3 \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon^2}{3}\right) \cdot (1+4\varepsilon^2+\varepsilon^4)}{1+\varepsilon}.$$

where  $\gamma$  – he specific conductivity of the electrolyte.

Formula (8) can be used when  $k(b + c) < 7$  [9].

We will also consider the active resistance of the electrolyte in all cases, based on the finite value of its specific conductivity  $\gamma$ . Thus, the resistance of the electrolyte will be determined by the formula

$$R = \frac{d}{\gamma \cdot S}. \quad (9)$$

where  $d$  is the distance between the electrodes;  $S$  is the average area of the electrodes.

All calculations, both numerical and analytical, in the work were performed for nonlinear circuits of industrial electrolyzers. At the same time, experimental verification of the obtained results was carried out in laboratory conditions on a scaled-down model of the setup, based on similarity theory [12]. Therefore, let us formulate the main principles on which it is based and the requirements for this model.

The electrical equivalent circuit of the model and the real circuit must be identical, while the model and the actual system will be described by similar differential equations, differing only in similarity constants.

The model must be synchronous, meaning it operates in real-time scale.

Voltage drops at the anode and cathode, as well as current densities in the model and the real setup, should be the same to ensure consistent coating quality and deposition rate.

The electrolyte composition, temperature, and specific interfacial capacitances between the cathode-electrolyte and anode-electrolyte must also be the same. Consequently, the specific resistances of the electrolyte, the current-voltage characteristics at the interfacial boundaries, which in turn provide the same distribution of partial deposition current densities, should be identical.

The implementation of these principles using technical means is provided below.

## 2. Methods and equipment for experimental verification of calculated results

The verification of calculated results obtained by the proposed method was conducted experimentally in laboratory conditions by studying processes, particularly the cathodic voltage drop, in a series of electrochemical circuits of the "power supply – metal electroplating electrolyzer" system.

When supplying electric circuits from a constant voltage source, the circuit in Fig. 6 was used. It consists of two loops: polarizing and potentiometric (or measuring). The polarizing loop, intended for the flow of working current, consists of a battery AB with a voltage of 100–200 V, resistor R, ammeter A, and electrolytic cell  $K_0$ . Standard cells of type YASE-2 or EYA-3 were used, where A is the anode, K is the cathode, and EP is the reference electrode. The potentiometric loop, designed for measuring the cathodic potential  $V(t)$  or the cathodic voltage drop  $u_k(t)$  in addition to electrodes K and EP, also includes a cathode voltmeter V, an oscilloscope with a direct current amplifier, and a potentiometer P, which compensates for the DC component of the voltage between the studied electrode K and the reference electrode EP. The cathode voltmeter V and the oscilloscope had high input resistances (the current in the measuring loop did not exceed  $10^{-8}$  A).

The circuit in Fig. 6 was also used to obtain volt-ampere characteristics of the subsystems cathode-electrolyte and anode-electrolyte as nonlinear elements of the electrochemical circuit.

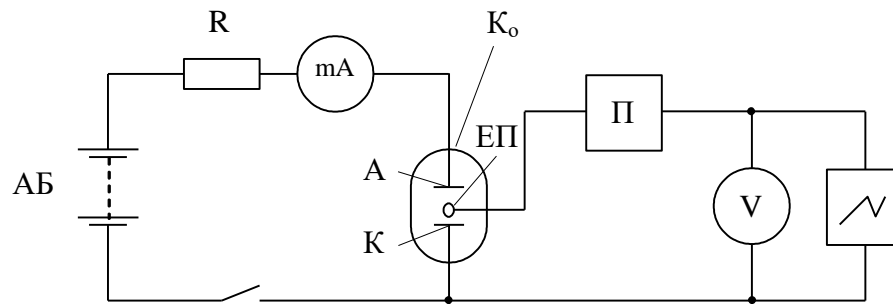
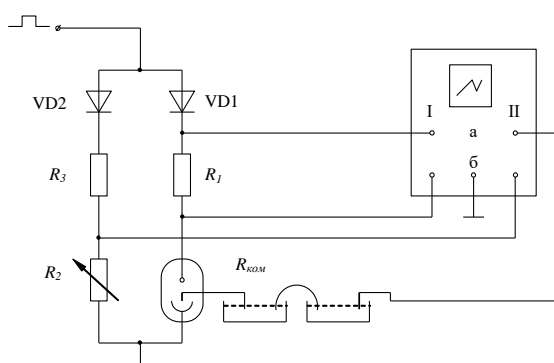
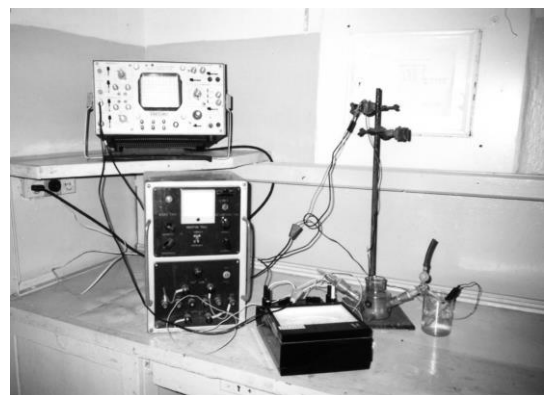


Figure 6 - Scheme of the setup for studying processes under direct current

Measurements of the cathodic voltage drop  $u_k(t)$  (or cathodic potential) when supplying the electrodeposition electrolyzer from a non-sinusoidal current or voltage source (in the so-called pulse electrolysis [1]) were carried out on a setup that compensates for the voltage drop in the active resistance of the electrolyte (Fig. 7). The cell was switched on in a two-electrode configuration. As known [1], if the condition  $R_1R_2 = R_3R_{\text{КОМ}}$  is satisfied in the circuit of Fig. 8, then the mentioned voltage drop is equal to the voltage across  $R_2$ , and the differential input 1 of the oscilloscope registers the potential of the cathode relative to a standard silver chloride electrode. The second input II of the device records the voltage drop  $u_{ab}$ , which is proportional to the cell current. The equality of currents in both branches was achieved by adjusting the resistances of resistors  $R_1$  and  $R_3$  and the volt-ampere characteristics of diodes  $VD_1$  and  $VD_2$ .



a)



b)

Figure 7 - Scheme of the setup for studying processes during pulse electrolysis (a); photograph of the laboratory setup for pulse metal deposition (b)

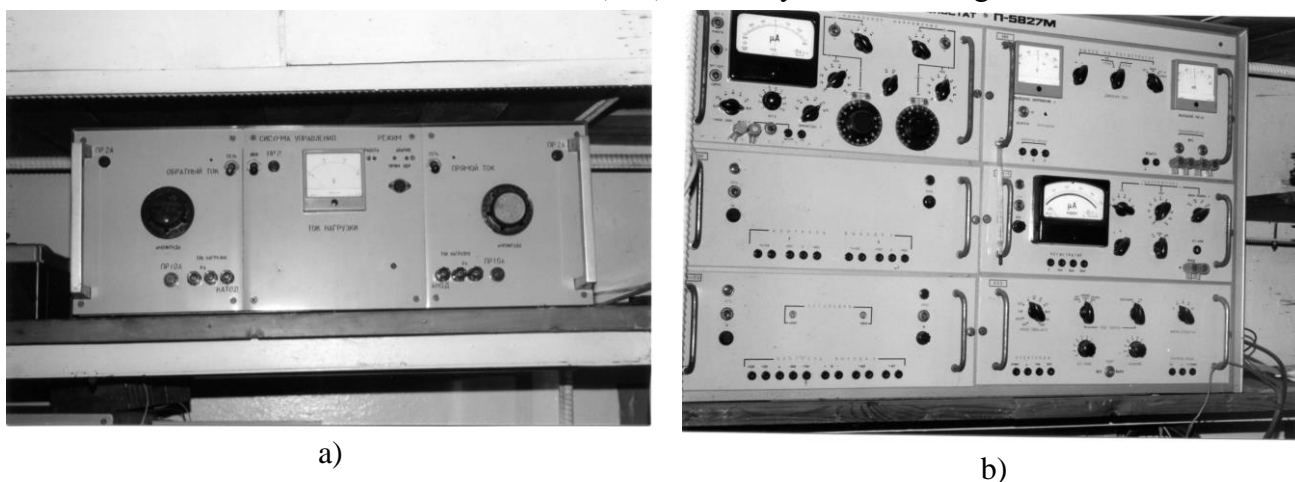


Figure 8 - Photographs of laboratory power sources for pulse electrolysis

As laboratory sources of pulsed current, serial pulse generators (G5-54, G3-34) in combination with a single-stage transistor amplifier or specially designed energy sources were used (Fig. 8). A reversible block of output cascades served as the power amplifier. Pulse transformers of the output cascade block were designed considering the possibility of transmitting pulse lengths longer than the supply pulse length. The generator and output cascade block were powered from stabilized constant voltage sources of the "Agat" type.

The registration of the time dependencies of the current and electrode potential was performed by photographing them from the screens of electronic oscilloscopes C1-68, C1-83, C8-14 with a sensitivity of 1 mV/cm. The input resistance of the voltage amplifiers used for potential measurements was not less than  $10^9$  Ohms. The average current value was determined by integrating the voltage drop curves across  $R_1$  and in some cases using sample magnetoelectric instruments of the M253, M254 type with an accuracy class of 0.5. At low pulse frequencies, the use of magnetoelectric milliammeters for small measurement ranges leads to distortion of the supply pulse shape. Consequently, the average current values measured by the device and found from the oscillograms do not coincide. The reason for this phenomenon lies in the influence of the inherent inductance of the built-in shunts of the ammeters. Therefore, electronic measuring devices (oscilloscopes and digital voltmeters B7-21, B7-21A) that record the voltage drop on the combined non-inductive shunt, which was connected in the electrochemical cell circuit, were used for measuring pulse currents, including the average value. Meanwhile, in the case of pulse mode experiments, the use of typical constant current shunts is impractical due to their overheating caused by the thermal losses of higher harmonic currents and the skin effect phenomenon. These phenomena progress with the compression of pulses, increasing their amplitude and frequency. Therefore, special measuring shunts were fabricated, the use of which did not lead to the mentioned negative phenomena. The value of the cathodic potential was recorded relative to a standard silver chloride electrode of the EVL-1MX type with subsequent recalibration to the hydrogen reference electrode. Experiments under identical conditions were conducted at least three times, and the results were considered reproducible if they coincided within  $\pm 3\%$ . Each experimentally obtained volt-ampere characteristic was recorded in a fresh portion of the electrolyte.

The measurement of the so-called stationary potential of a de-energized electrode, which gives its initial value, was carried out using a technique elements of which were borrowed from [1]. For this purpose, a special cell was used. The stationary potential of freshly deposited coating was recorded in the electrolyte of its own ions automatically 3 - 5 ms after the current was switched off.

The value of the electrode capacitance  $C_k$  was determined from the known Frumkin-Kolotyrkin relationship [1]:

$$u_k(t_p) = u_k(0) - b_M \cdot \ln \left( 1 + \frac{j(0)}{b_M \cdot C_k} \cdot t \right), \quad (10)$$

where  $u_k(0)$ ,  $j(0)$  are the cathodic voltage drop and current density before circuit disconnection;  $u_k(t_p)$  is the cathodic voltage drop after time  $t_p$  following circuit disconnection;  $b_M$  is the Tafel equation constant.

Since for the initial segment of the voltage drop

$$t \ll \frac{b_M \cdot C_k}{j(0)}, \quad (11)$$

Then

$$C_k = \frac{j(0) \cdot t_p}{u_k(t_p) - u_k(0)}. \quad (12)$$

The specific resistance of the electrolytes was measured using the bridge method in a special electrolytic cell according to [13]. All electronic measuring instruments had standardized metrological characteristics and were regularly subjected to verification and calibration.

### 3. Approximation of volt-ampere characteristics of nonlinear electrochemical elements

To perform an analytical calculation of a circuit containing nonlinear elements, it is necessary to have functions that describe the volt-ampere characteristics of these nonlinear elements. In this work, these characteristics were obtained in tabular form experimentally, using the methodology described in the previous section. To approximate the data from the table or graph, constructed from experimental data, we first define the general structure of the approximating function, and then determine the parameters that enter into this expression. Since the ultimate goal of analytical calculations in this work is primarily to obtain functions of partial deposition currents and cathode overvoltage as a function of time in explicit form, the main criterion in choosing the general structure of the approximating expression is its suitability for obtaining the solution of the mentioned form when applying the method of variable transformation. In addition, it is logical to seek maximum simplicity and conciseness of the chosen structure. These considerations practically make widely known analytical expressions that relate cathode overvoltage to the partial cathode current unsuitable for application in this work.

Therefore, we mainly apply polynomial approximation, particularly for the case of activation polarization (cathode overvoltage) in the form of an incomplete cubic polynomial

$$j_k(u_k) = z_{01} u_k + z_{03} u_k^3, \quad (13)$$

If there are regions of negative differential resistance on the specified volt-ampere characteristics (VAC), a complete cubic polynomial is used.

$$j_k(u_k) = z_{01} u_k + z_{02} u_k^2 + z_{03} u_k^3. \quad (14)$$

The expressions (13) and (14) mentioned above satisfy the criteria mentioned earlier and are consistent with the qualitative appearance of the volt-ampere characteristics (VAC) of the nonlinear electrochemical elements used in this work (Fig. 3). The criterion of accuracy of the approximation in this case is the criterion of root-mean-square approximation [14].

$$\left( \frac{1}{b-a} \cdot \int_a^b (\tilde{f}(x) - f(x))^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \leq \delta \quad (15)$$

where  $\tilde{f}(x)$  – the value of the approximating function;  $f(x)$  – the value of the function being approximated; a, b – the limits of the approximation interval;  $\delta$  – the permissible deviation value.

In general, as noted in [14], the accuracy requirements in approximation problems are usually not high; the approximation accuracy should be of the same order as the accuracy of the given characteristic.

To conduct analytical calculations in this work, the following approximations of the VACs of electrochemical elements are necessary:

- Anode dissolution current density from the anodic voltage drop  $j_{ma}(u_a)$ .
- Copper deposition current density from the cathodic voltage drop  $j_{Cu}(u_c)$ .
- Copper deposition current density from the cathodic voltage drop in the presence of PAR in the electrolyte  $j_{mp}(u_c)$ .
- Nickel deposition current density from the cathodic voltage drop  $j_{Ni}(u_c)$ .
- Iron deposition current density from the cathodic voltage drop  $j_{Fe}(u_c)$ .
- Hydrogen evolution current density from the cathodic voltage drop  $j_H(u_c)$ .

For the first two characteristics, we will use linear approximation, aiming for the simplest approximating expression. We will approximate the third characteristic with a complete cubic polynomial since it will allow us to represent the region of negative differential resistance. Characteristics 5 and 6 will be approximated by an incomplete cubic polynomial to facilitate the solution process. For the hydrogen approximation, we will use the classical electrochemical approach, using the Tafel equation (6). The coefficients for this approximation are borrowed from [9-11].

Since the method outlined in the previous section involves obtaining the total VAC:

$$j_K(u_K) = j_{MK}(u_K) + j_H(u_K), \quad (16)$$

it is need to separate the parts of the current density that contribute to the deposition of metal and the evolution of hydrogen. We will do this according to formula (2.16), using the experimental results  $j_{os}(u_c)$  and formula (6) for  $j_H(u_c)$ . The results of the approximation for each of the six characteristics will be summarized in Table 2.2.

Table 2

Approximation of experimentally obtained VACs of nonlinear electrochemical elements

Nonlinear dependence	Electrolyte composition, conditions	Structure of the approximating expression	Approximation coefficients	Argument, V	Function (experimental), A/cm <sup>2</sup>	Function (approximated), A/cm <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
$j_{Ni}(u_a)$	NiSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O–200 g/L, NaCl–10 g/L, H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub> –30 g/L, <i>t</i> <sup>°</sup> <sub>el</sub> = 20°C.	$j_a(u_a) = \frac{u_a}{R_a S_a}$	$R_a = 0,06 \text{ Ohm}$	0,00	0,00	0,000
				0,05	$5,13 \cdot 10^{-5}$	$8,333 \cdot 10^{-5}$
				0,10	$1,09 \cdot 10^{-4}$	$1,667 \cdot 10^{-4}$
				0,15	$1,51 \cdot 10^{-4}$	$2,500 \cdot 10^{-4}$
				0,20	$2,74 \cdot 10^{-4}$	$3,333 \cdot 10^{-4}$
				0,25	$3,66 \cdot 10^{-4}$	$4,167 \cdot 10^{-4}$
				0,30	$5,98 \cdot 10^{-4}$	$5,000 \cdot 10^{-4}$
				0,35	$6,99 \cdot 10^{-4}$	$5,833 \cdot 10^{-4}$
				0,40	$7,44 \cdot 10^{-4}$	$6,667 \cdot 10^{-4}$
				0,45	$7,80 \cdot 10^{-4}$	$7,500 \cdot 10^{-4}$
				0,50	$9,08 \cdot 10^{-4}$	$8,333 \cdot 10^{-4}$
0,60	$1,12 \cdot 10^{-3}$	$1,000 \cdot 10^{-3}$				
1	2	3	4	5	6	7
$j_{Cu}(u_K)$	CuSO <sub>4</sub> –250 g/L, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> –70 g/L, <i>t</i> <sup>°</sup> <sub>el</sub> = 20°C.	$j_{Cu}(u_K) = \frac{u_K}{R_{Cu} S_K}$	$R_{Cu} = 6,667 \times 10^{-4} \text{ Ohm.}$	0,00	0,00	0,00
				0,05	$9,0 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$
				0,10	$6,9 \cdot 10^{-3}$	$15 \cdot 10^{-3}$
				0,15	$16,1 \cdot 10^{-3}$	$22 \cdot 10^{-3}$
				0,20	$24,9 \cdot 10^{-3}$	$30 \cdot 10^{-3}$
				0,25	$48,6 \cdot 10^{-3}$	$37 \cdot 10^{-3}$
				0,30	$50,9 \cdot 10^{-3}$	$45 \cdot 10^{-3}$
				0,35	$56,4 \cdot 10^{-3}$	$52 \cdot 10^{-3}$
				0,40	$66,7 \cdot 10^{-3}$	$60 \cdot 10^{-3}$
				0,45	$69,6 \cdot 10^{-3}$	$67 \cdot 10^{-3}$
				0,50	$70,3 \cdot 10^{-3}$	$75 \cdot 10^{-3}$
1	2	3	4	5	6	7
$j_{Zn}(u_K)$	CuSO <sub>4</sub> –250 g/L, H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> –70 g/L, глюцеталь –1,0 g/L, <i>t</i> <sup>°</sup> <sub>el</sub> = 20°C.	$j_{Zn}(u_K) = z_{01} u_K + z_{02} u_K^2 + z_{03} u_K^3$	$z_{10} = 1,053 \text{ S/cm}^2,$ $z_{20} = -6,202 \text{ S/(V} \cdot \text{cm}^2),$ $z_{30} = 10,691 \text{ Cm/(B}^2 \cdot \text{cm}^2).$	0,00	0,00	0,00
				0,05	$58 \cdot 10^{-3}$	$38 \cdot 10^{-3}$
				0,10	$88 \cdot 10^{-3}$	$54 \cdot 10^{-3}$
				0,15	$55 \cdot 10^{-3}$	$54 \cdot 10^{-3}$
				0,20	$28 \cdot 10^{-3}$	$48 \cdot 10^{-3}$
				0,25	$21 \cdot 10^{-3}$	$43 \cdot 10^{-3}$
0,30	$17 \cdot 10^{-3}$	$46 \cdot 10^{-3}$				
0,35	$49 \cdot 10^{-3}$	$67 \cdot 10^{-3}$				
0,40	$143 \cdot 10^{-3}$	$113 \cdot 10^{-3}$				
0,45	$216 \cdot 10^{-3}$	$192 \cdot 10^{-3}$				
0,50	$317 \cdot 10^{-3}$	$312 \cdot 10^{-3}$				
1	2	3	4	5	6	7
$j_{Ni}(u_K)$	NiSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O–200 g/L, NaCl–10 g/L, H <sub>3</sub> BO <sub>4</sub> –30 g/L, <i>t</i> <sup>°</sup> <sub>el</sub> = 20°C.	$j_{Ni}(u_K) = z_{01} u_K + z_{02} u_K^2$	$z_{01} = 8,0 \cdot 10^{-4} \text{ S/cm}^2,$ $z_{03} = 0,061 \text{ Cm/(V}^2 \cdot \text{cm}^2).$	0	0	0
				0,05	$0,5 \cdot 10^{-4}$	$0,48 \cdot 10^{-4}$
				0,10	$5,1 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$
				0,15	$5,5 \cdot 10^{-4}$	$3,3 \cdot 10^{-4}$
				0,20	$9,1 \cdot 10^{-4}$	$6,5 \cdot 10^{-4}$
				0,25	$1,8 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$
				0,30	$1,9 \cdot 10^{-3}$	$1,9 \cdot 10^{-3}$
				0,35	$2,2 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$
				0,40	$3,7 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-3}$
				0,45	$5,4 \cdot 10^{-3}$	$5,9 \cdot 10^{-3}$
				0,50	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$
0,55	$10,7 \cdot 10^{-3}$	$11,0 \cdot 10^{-3}$				
0,60	$12,2 \cdot 10^{-3}$	$14,0 \cdot 10^{-3}$				

1	2	3	4	5	6	7
$j_H(u_k)$	-	$j_H(u_k) = j_{0H} e^{(-\alpha_H \frac{zF}{RT} u_k)}$	$\alpha_H=0,62$ $\frac{zF}{RT} =$ $=25,7 \cdot 10^3 \text{ V}^{-1}$ $j_{0H}=3,9 \cdot 10^{-9} \text{ A/sm}^2$	0	-	$3,9 \cdot 10^{-9}$
				0,05		$1,303 \cdot 10^{-8}$
				0,10		$4,353 \cdot 10^{-8}$
				0,15		$1,454 \cdot 10^{-7}$
				0,20		$4,858 \cdot 10^{-7}$
				0,25		$1,623 \cdot 10^{-6}$
				0,30		$5,423 \cdot 10^{-6}$
				0,35		$1,812 \cdot 10^{-5}$
				0,40		$6,052 \cdot 10^{-5}$
				0,45		$2,022 \cdot 10^{-4}$
				0,50		$6,755 \cdot 10^{-4}$
				0,55		$2,257 \cdot 10^{-3}$
				0,60		$7,54 \cdot 10^{-3}$
				0,65		0,025
				0,70		0,084
0,75		0,281				
0,80		0,939				

Figures 9-14 show the corresponding approximated current-voltage characteristics (CVC) with experimental points plotted, which visually allows for the assessment of the approximation accuracy. From Figure 14, it is evident that significant hydrogen evolution begins at cathodic overpotentials greater than 0.6 V. Accordingly, this process can be neglected if the maximum value of the cathodic overpotential during metal deposition does not exceed this value.

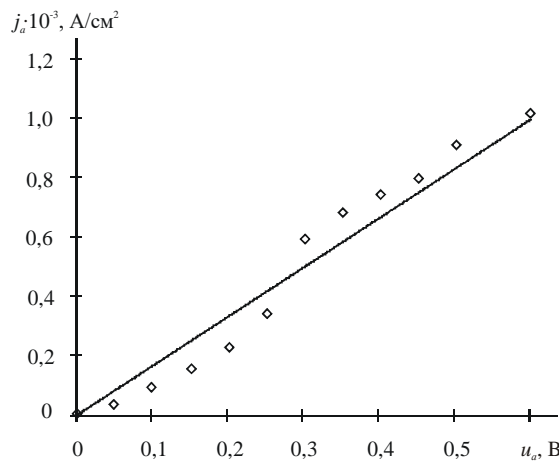


Figure 9 - Dependence of the current density of anode dissolution on the anodic overpotential  $j_a(u_a)$ :  $\diamond$ —experiment, — —approximation

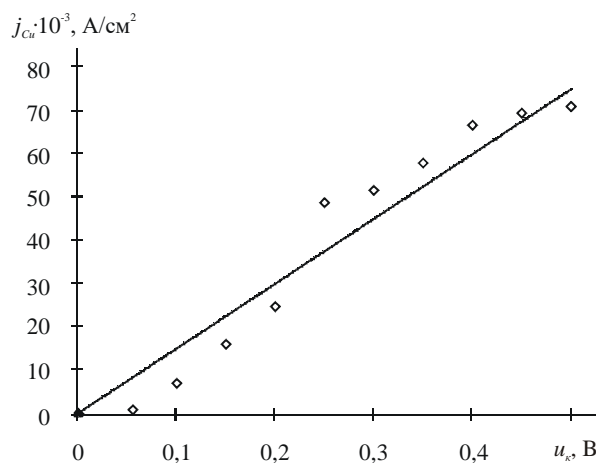


Figure 10 - Dependence of the current density of copper deposition on the cathodic overpotential  $j_{Cu}(u_k)$ :  $\diamond$  – experiment, — – approximation

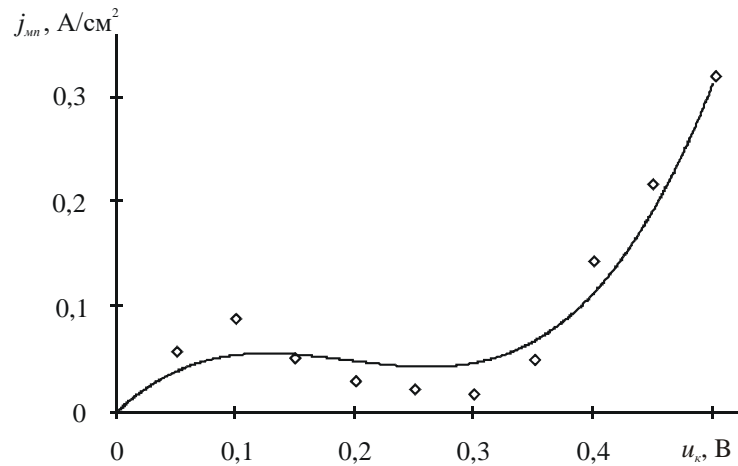


Figure 11 - Dependence of the current density of copper deposition on the cathodic overpotential in the presence of PAR in the electrolyte  $j_{mp}(u_k)$ :  
 $\diamond$  – experiment, — – approximation

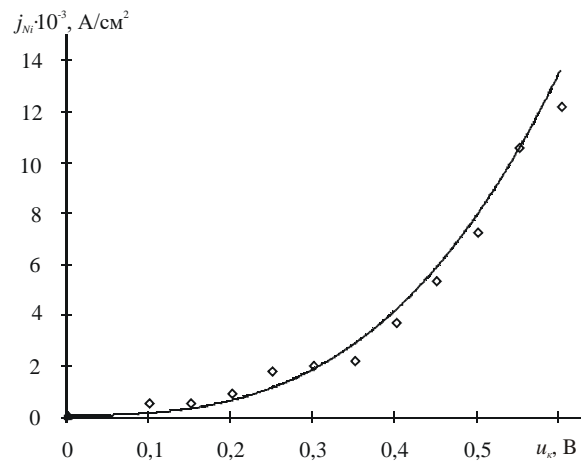


Figure 12 -Dependence of the current density of nickel deposition on the cathodic overpotential  $j_{Ni}(u_k)$ :  $\diamond$  – experiment, — – approximation

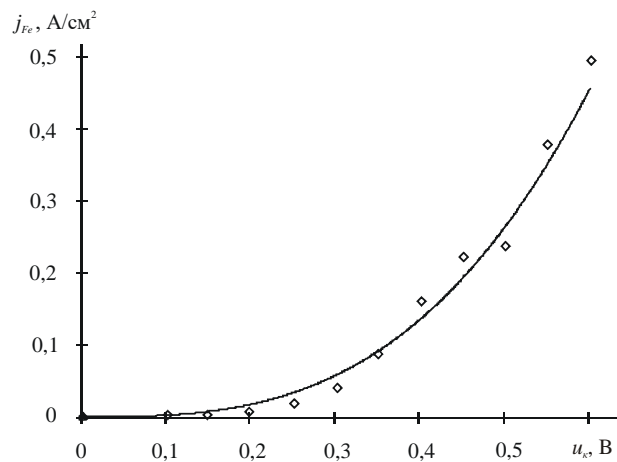


Figure 13. Dependence of the current density of iron deposition on the cathodic overpotential  $j_{Fe}(u_k)$ :  $\diamond$  – experiment, — – approximation

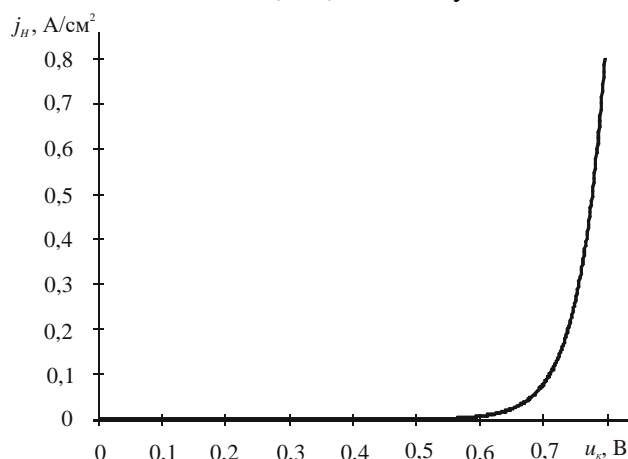


Figure 14. Dependence of the current density of hydrogen evolution on the cathodic overpotential  $j_H(u_k)$

### Conclusions

As seen from Section 1, from the standpoint of theoretical electrical engineering, the electrical circuit of the electrolyzer represents an electrical circuit with at least one nonlinear electrochemical element, which is described by the volt-ampere characteristic of the phase boundary between the cathode and the electrolyte.

Even considering possible simplifications, for an adequate representation of processes in the electrolyzer, the mentioned circuit should contain no fewer than two energy-consuming elements (two capacitors or an inductance and a capacitor).

The methodology of experimental research described in Section 2 is quite complex, requiring a specially equipped laboratory, equipment, and the availability of electrolyte components. Similar experiments in industrial plants are generally prohibitively expensive. This underscores the general necessity of widespread use of mathematical modeling to explore new metal deposition regimes in pulse electrolysis with significantly reduced experimental research. However, only the presence of an analytical solution for the specified circuit can ensure a wide variation of circuit parameters in this case.

The approximating expressions (13), (14) proposed in Section 3 for the CVCs of nonlinear electrochemical elements, while not "classical" for electrochemistry, are suitable for describing the obtained experimental data. These expressions are sufficiently simple in structure, and their accuracy is of the same order as the accuracy of the characteristics themselves.

From Section 3, it is evident that the process of hydrogen evolution can be disregarded for cathodic overpotentials up to 0.55 V, as its partial current within these limits is small relative to the current of deposition of any of the considered metals.

### REFERENCES

1. Shydlovska N.A. Problems of analyzing nonlinear electrical circuits // Technical Electrodynamics. Thematic issue 'Problems of Modern Electrical Engineering'. – 2000. – Part 1. – pp. 20 – 24.
2. Horodyskyi A.V. Voltammetry. Kinetics of stationary electrolysis. – Kyiv: Naukova Dumka, 1988. – 176 p.
3. Bagotsky V.S. Fundamentals of Electrochemistry. - Moscow: Khimiya, 1988. - 400 p.

4. Antropov L.I. Theoretical Electrochemistry. - Moscow: Higher School, 1975. - 568 p
5. Bondar, I.L., Kostin, N.A. "Investigation of Nonlinear Electrochemical Circuits Using Taylor Transformations." *Electronic Modeling*, 1980, no. 3, pp. 55–57.
6. Kostin, N.A., Bondar, O.I., Mikhaylenko, Yu.V., Artemchuk, V.V. "Modeling the Process of Electrolytic Deposition of Iron for the Restoration of Rolling Stock Parts." *Technical Electrodynamics. Thematic Issue "Modeling of Electronic, Energy, and Technological Systems,"* 1999, part II, pp. 35–38.
7. Kostin, N.A., Sheykina, O.G. "Electroimpulse Deposition of Metals and Alloys." *Technical Electrodynamics. Thematic Issue "Problems of Modern Electrotechnics,"* 2000, part 1, pp. 74–77.
8. Kostin, N.A., Kulikov, A.A. *Application of Electroplating Techniques in the Repair of Rolling Stock*. Moscow: Transport, 1981. 109 pages.
9. Kalantarov, P.L., Tseitlin, L.A. *Calculation of Inductances: Reference Book*. Leningrad: Energoatomizdat, Leningrad Division, 1986. 488 pages
10. C. J. Fourie and W. J. Perold, "Reflection plane placement in numerical inductance calculations using the method of images for thin-film superconducting structures," in *Transactions of the South African Institute of Electrical Engineers*, vol. 94, no. 2, pp. 18-24, July 2003.
11. C. J. Fourie, "Calibration of Inductance Calculations to Measurement Data for Superconductive Integrated Circuit Processes," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 23, no. 3, pp. 1301305-1301305, June 2013, Art no. 1301305, doi: 10.1109/TASC.2012.2234815
12. Tetelbaum, I.M., Tetelbaum, Ya.I. *Direct Analogy Models*. Moscow: Nauka, 1979. - 383 pages
13. Kadaner, L.I. *Handbook on Galvanostegy*. Kyiv: Tekhnika, 1976. - 253 p.
14. Zaiznyi, A.M. *Fundamentals of Calculations for Nonlinear and Parametric Radio Engineering Circuits*. Moscow: Svyaz, 1973. - 448 p.

Received 30.05.2024.  
Accepted 06.06.2024.

***Principles of constructing equivalent circuits for nonlinear electrochemical elements: analysis and experimental parameter determination***

The analysis of nonlinear circuits is one of the most important tasks of modern electrical engineering and electronics. Unlike linear circuits, which are characterized by linear relationships between voltages and currents on the elements, in non-linear circuits the corresponding dependencies are more complex. Accordingly, in the general case, electromagnetic processes in the specified circles are characterized by systems of nonlinear differential equations. At the same time, one of the main problems in the field of analysis of nonlinear circles is the lack of universal calculation methods. First of all, this applies to analytical methods that actually allow you to obtain general laws that allow you to study the effect of changing various parameters on the nature of the process in the circle.

Thus, the task of developing and adapting existing methods of calculating nonlinear systems for the analysis of processes in circles with nonlinear elements of various natures arises. In particular, this work is devoted to the issue of developing equivalent schemes for replacing electrotechnical complexes of electrolytic deposition of metals, as well as experimental research on obtaining current-current characteristics of nonlinear elements of these schemes.

The paper proposes a generalized scheme for replacing the electrolyzer for the deposition of metal coatings. As nonlinear elements of the specified scheme, the dependences of the partial cur-

rents of metal dissolution and deposition on the near-anode or near-cathode voltage drop are considered, respectively. The possibility of applying certain simplifications in the general scheme, depending on the peculiarities of the deposition process of one or another metal, was also analyzed.

At the same time, the general structure of approximating expressions is proposed and the approximation coefficients for individual nonlinear electrochemical elements are determined. The specified expressions differ from the previously known ones in that their structure is suitable for obtaining the general regularities of electromagnetic processes that take place in systems of pulse electrodeposition of metals in an explicit form.

Key words: pulse electrolysis, nonlinear circuits, electrochemical elements, cathode polarization, deposition current, analytical approximation, cubic polynomial.

**Бондар Олег** - к.т.н., доцент, кафедра електротехніки та електромеханіки, Український державний університет науки і технологій.

**Ніколенко Анатолій** - к.т.н., доцент, кафедра електричної інженерії, Український державний університет науки і технологій.

**Коваленко Віктор** - д.т.н., проф. кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, Запорізький національний університет.

**Китаєв Олег** - кафедра електротехніки та електромеханіки, Український державний університет науки і технологій.

**Степаненко Олег** - кафедра електротехніки та електромеханіки, Український державний університет науки і технологій.

**Сіверський Сергій** - кафедра електротехніки та електромеханіки, Український державний університет науки і технологій.

**Сприса Василь** - кафедра електричної інженерії та кіберфізичних систем, Запорізький національний університет.

**Bondar Oleh** - PHD, Associate Professor, department of electrical engineering and electromechanics, Ukrainian State University of Science and Technologies.

**Nikolenko Anatolii** - PHD, Associate Professor, Department of Electrical Engineering Ukrainian State University of Science and Technologies.

**Kovalenko Viktor** - Doctor of Technical Sciences, prof. Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Zaporizhzhia National University.

**Kitaev Oleh** - Ukrainian State University of Science and Technologies, Lazaryan str., 2, Dnipro, 49010, Ukraine Stepanenko Oleh, Ukrainian State University of Science and Technologies.

**Siversky Serhii** - Ukrainian State University of Science and Technologies.

**Sprysa Vasyl** - Department of Electrical Engineering and Cyber-Physical Systems, Zaporizhzhia National University.

Д.Д. Охримчук, Т.Г. Ємел'яненко

## РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦІЇ РОЗРАХУНКІВ ПІД ЧАС АНАЛІЗУ ГІДРОГЕОХІМІЧНИХ ДАНИХ

*Анотація.* У статті описано створення програмного застосунку для автоматизації розрахунків на основі гідрогеохімічних даних та формування звітів, що є актуальним у зв'язку з необхідністю підвищення зручності обробки інформації та формування звітів. Ручна обробка може призводити до можливих помилок і зниження продуктивності. Метою дослідження є розробка застосунку за допомогою технологій C# та MySQL для спрощення зберігання та структуризації даних. Результати показують підвищення швидкості і зручності формування звітності. Застосунок має перспективи для подальших вдосконалень і розширення функціоналу в майбутніх дослідженнях.

*Ключові слова:* гідрогеохімічний моніторинг, гідрогеохімія, програмне забезпечення, програмний застосунок, база даних, діаграма класів, C#, MySQL, звітність.

**Постановка проблеми.** Гідрогеохімія, як важлива галузь наукових досліджень, стає все більш актуальною в умовах зростаючих глобальних екологічних викликів [1]. Ця інтердисциплінарна наука об'єднує принципи геології та хімії для аналізу хімічного складу підземних вод та їх взаємодії з геологічним середовищем. Основне завдання гідрогеохімії полягає у вивченні процесів, таких як розчинення мінералів, іонний обмін та інші хімічні реакції, які відбуваються в підземних водах. Ці процеси мають вирішальне значення для розуміння екологічного стану водних басейнів, а також для забезпечення якості питної води та її придатності для сільськогосподарських потреб.

Традиційні підходи до гідрогеохімічних досліджень часто вимагають ручної обробки великих масивів даних, що може призвести до помилок та неефективності. У світлі стрімкого розвитку інформаційних технологій виникає необхідність адаптації цієї галузі до сучасних вимог цифровізації. Впровадження сучасних технологічних рішень, таких як автоматизація збору та обробки даних, машинне навчання та штучний інтелект, може значно оптимізувати процеси аналізу гідрогеохімічних показників. Це не тільки сприяє підвищенню точності та швидкості досліджень, але й відкриває нові перспективи для виявлення та розуміння складних геохімічних процесів, що впливають на якість водних ресурсів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні дослідження в галузі гідрогеохімії активно зосереджуються на використанні технологій для аналізу та прогнозування якості води. Одним із прикладів є дослідження [2], яке оцінювало ризики забруднення арсеном у підземних водах Вехарі, Пакистан, використовуючи штучні нейронні мережі для прогно-

зування рівнів арсену. Інше дослідження [3] присвячено оцінці якості підземних вод у Бангладеші на основі індексу якості води. Активно проводяться дослідження про антропогенний та кліматичний вплив на підземні води [4].

Ці та інші дослідження підкреслюють зростаючу потребу в автоматизації обробки великих обсягів даних та впровадженні передових методів аналізу для точної оцінки якості води.

Програмний застосунок, який спрощує збір та аналіз гідрогеохімічних даних, має потенціал для розвитку і застосування, особливо у контексті використання зібраних даних для прогнозування майбутнього стану води в джерелах.

В світі вже існують застосунки, які активно використовуються для досліджень води в гідрогеохімії. Найчастіше для розв'язання задач аналізу гідрогеохімічних даних використовується AQUACHEM [5] - програмний інструментарій для гідрогеохімічних досліджень. Але ця система є великим корпоративним продуктом, який не є безкоштовним, і його використання маленькими лабораторіями і дослідниками може бути недоцільним з точки зору використання коштів.

**Мета дослідження.** Основною метою роботи є розробка програмного застосунку з акцентом на автоматизацію обробки даних і прискорення розрахунків гідрогеохімічних показників та формування звітності.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Структура програмного застосунку складається з 5 частин (див. рис. 1).

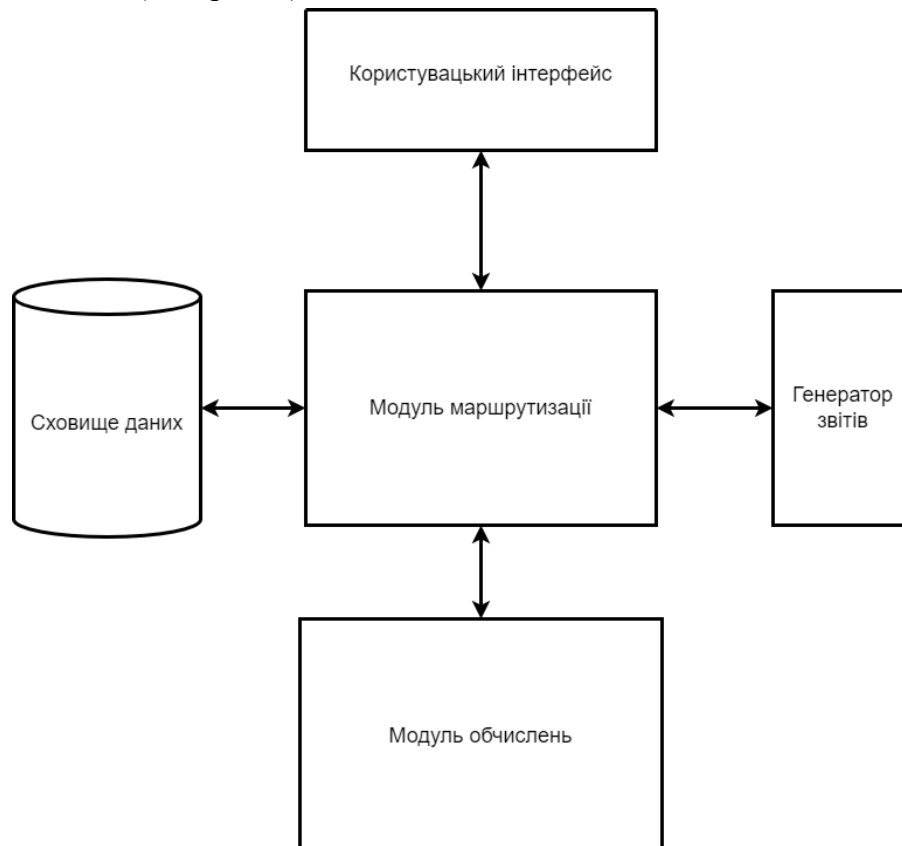


Рисунок 1 - Структура технічного доробку

Була побудована діаграма класів що відповідає структурі програмного застосунку (див. рис. 2).

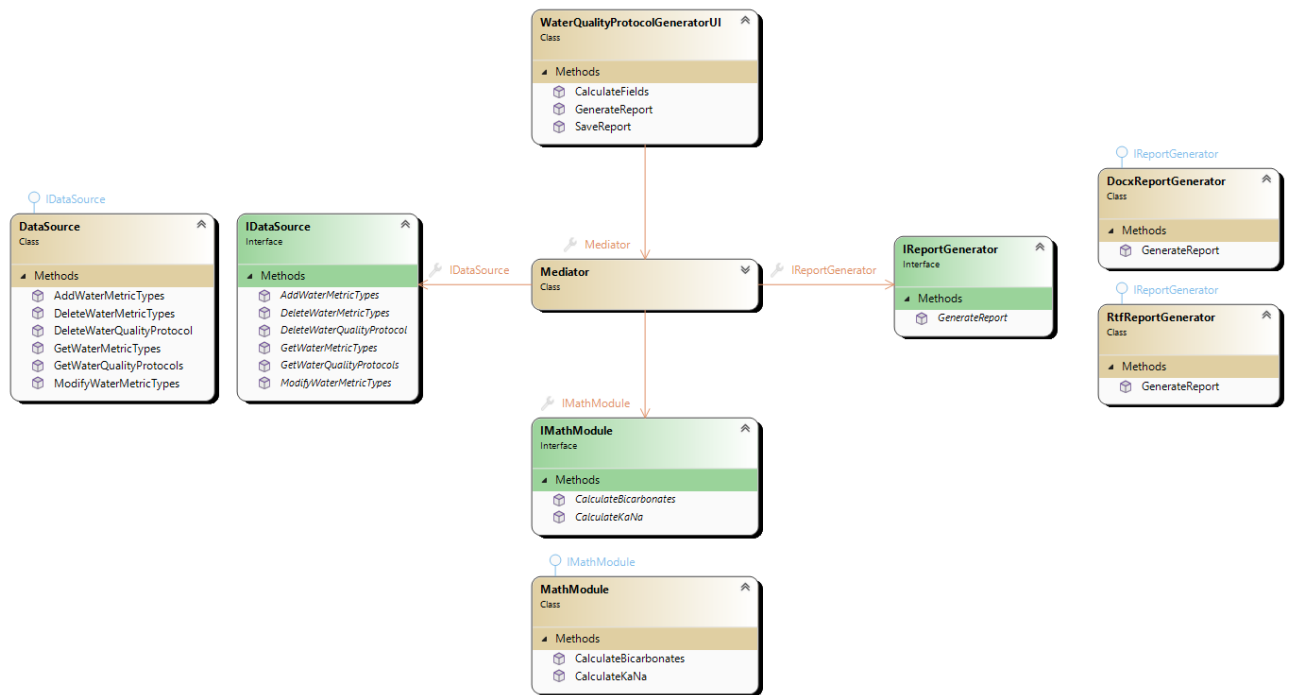


Рисунок 2 - Діаграма класів застосунку

– DataSource. Клас, який визначає джерело даних. Він має методи для додавання, видалення, отримання та модифікації типів метрик води, а також для роботи з протоколами якості води.

– IDataSource. Інтерфейс, що визначає контракт для класу DataSource, з переліком методів, які повинен реалізувати будь—який клас, що працює як джерело даних.

– WaterQualityProtocolGeneratorUI. Клас інтерфейсу користувача, який використовується для генерації звітів про якість води. Він містить методи для розрахунку певних полів, генерації звіту та збереження звіту.

– Mediator. Клас, який слугує посередником, щоб забезпечити взаємодію між різними компонентами системи.

– IMathModule. Інтерфейс, який визначає математичні методи.

– MathModule. Клас, що реалізує інтерфейс IMathModule.

– IReportGenerator. Інтерфейс для генерації звітів, має метод GenerateReport.

– DocxReportGenerator та RtfReportGenerator. Класи, що реалізують інтерфейс IReportGenerator для створення звітів у форматах DOCX та RTF відповідно.

На схемі видно зв'язок між класом Mediator та іншими компонентами системи, що дозволяє зменшити залежність між компонентами та полегшити їх взаємодію.

Важливо зауважити, що це не повна діаграма класів, а лише її частина. Є ще інші класи, які відсутні на діаграмі, такі як моделі звітів, класи для водних метрик, інші модулі тощо. Однак представлені на діаграмі елементи є основою застосунку і визначають його основну функціональність.

Далі детальніше описано кожен модуль окремо.

*Модуль маршрутизації.* Даний модуль виступає посередником між іншими частинами системи, що дозволяє додавати різні модулі незалежно один від одного і розширювати систему за відповідними запитами від гідрогеохіміків в необхідну сторону, додавати модулі із окремим функціоналом. Наприклад, *Генератор звітів*.

*Генератор звітів.* Модуль відповідає за генерацію звітів за шаблоном. Він отримує запит із даними на створення звіту із модуля маршрутизації і зберігає звіт в зазначене місце на диску.

*Сховище даних.* Модуль зберігає дані про попередні вимірювання, що дозволяє за необхідністю сформулювати звіт ще раз за збереженими місцем та датою. Також це дозволяє в рамках програмного застосунку розробляти нові модулі для прогнозування та аналізу статистичних даних вимірів, підключати їх до системи через модуль маршрутизації (див. рис. 3).

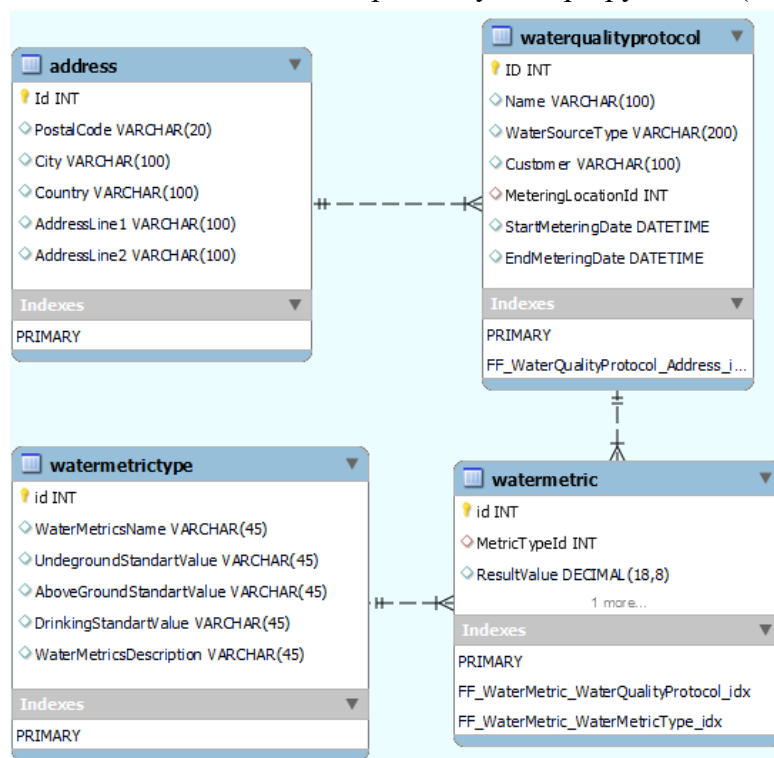


Рисунок 3 - Схема сховища даних

На зображенні ви можете побачити схему бази даних, яка складається з чотирьох таблиць: **address**, **waterqualityprotocol**, **watermetric**, і **watermetrictype**. Ця схема бази даних використовується для управління даними про водоміри та якість води.

Таблиця **address**. Зберігає інформацію про адреси місць замірів гідрогеохімічних показників.

- **Id**. Унікальний ідентифікатор адреси.
- **PostalCode**. Поштовий індекс місця замірів. Приймає текстові значення до 20 символів.
- **City**. Місто місця замірів. Приймає текстові значення до 100 символів.
- **Country**. Країна місця замірів. Приймає текстові значення до 100 символів.

- Address.line1. Перша частина адреси місця замірів. Приймає текстові значення до 100 символів.
- Address.line2. Друга частина адреси місця замірів. Приймає текстові значення до 100 символів.

Таблиця waterqualityprotocol зберігає протоколи якості води. Ця таблиця може використовуватися для збереження звітів про якість води, зібрані за певний період часу, з полями для імені, типу джерела води, замовника, ідентифікатора місця замірів показників та дат початку та кінця вимірювань.

- ID. Унікальний ідентифікатор протоколу.
- Name. Назва протоколу якості води. Приймає текстові значення до 100 символів.
- WaterSourceType. Тип джерела води. Приймає текстові значення до 200 символів.
- Customer. Замовник або клієнт, для якого ведеться протокол. Приймає текстові значення до 100 символів.
- MeteringLocationID. Ідентифікатор місця замірів. Приймає числові значення, що відповідають одному з ID в таблиці address.
- StartMeteringDate. Дата початку періоду замірів. Приймає значення дати.
- EndMeteringDate. Дата кінця періоду замірів. Приймає значення дати.

Таблиця watermetric використовується для зберігання індивідуальних показників, зібраних водомірами, з полями для ідентифікатора метрики, результату вимірювання і зв'язку з протоколом якості води.

- id. Унікальний ідентифікатор метрики.
- MetricTypeId. Ідентифікатор типу метрики. Ідентифікатор типу метрики. Приймає числові значення, що відповідають одному з ID в таблиці watermetrictype.
- ResultValue. Значення результату вимірювання. Приймає числові значення з плаваючою точкою.

Таблиця watermetrictype містить типи водометричних показників, які можуть включати стандартні значення для підземних і поверхневих вод, а також стандарт для питної води.

- id. Унікальний ідентифікатор типу метрики.
- WaterMetricsName. Назва водометричного показника. Приймає текстові значення до 45 символів.
- UndergroundStandardValue. Стандартне значення для підземних вод. Приймає текстові значення до 45 символів.
- AboveGroundStandardValue. Стандартне значення для надземних вод. Приймає текстові значення до 45 символів.
- DrinkingStandardValue. Стандартне значення для питної води. Приймає текстові значення до 45 символів.
- WaterMetricsDescription. Опис водометричних показників. Приймає текстові значення до 45 символів.

*Зв'язки між таблицями:*

- Таблиця waterqualityprotocol має зв'язок з таблицею address, що свідчить про те, що кожен протокол якості води пов'язаний з конкретною адресою.

– Таблиці watermetric та watermetrictype пов'язані, що свідчить про те, що кожен водометричний показник має тип, зазначений в watermetrictype.

– Таблиця watermetric також пов'язана з waterqualityprotocol, показуючи, що кожен показник є частиною певного протоколу якості води.

Індекси в таблицях використовуються для покращення продуктивності запитів, особливо при пошуку, сортуванні та з'єднаннях таблиць. Наприклад, індекс FF\_WaterMetric\_WaterQualityProtocol\_idx вказує на індекс, створений на основі зовнішнього ключа між watermetric та waterqualityprotocol, що дозволяє швидше знаходити записи в цих двох таблицях, коли вони зв'язані за WaterQualityProtocolID.

*Модуль обчислень.* Цей модуль дозволяє проводити додаткові обчислення, зберігає всередині себе математичні формули які можуть використовуватись для обчислень параметрів по результатах вимірів.

*Користувацький інтерфейс.* Користувацький інтерфейс використовується для заповнення таблиці результатами вимірів, а також він автоматично надсилає запити в модуль маршрутизації про отримання додаткових обчислень, генерації звіту, збереження обчислень в базу даних (див. рис. 4). Також в окремому вікні користувацького інтерфейсу можна завантажити дані в базу даних із вже наявних звітів (див. рис. 5).

Water Metric Type Id	Metric Type	Result Value
1	Кольоровість, (градус)	7.5
2	Запах, бали	1
3	Каламутність, мг/дм3	0.12
4	Водневий показник (од. рН)	7.24
5	Лужність загальна, мг-екв НСО3 <sup>-</sup> /дм3	12
6	Бікарбонати (НСО3 <sup>-</sup> ) мг/дм3	631.396
7	Сухий залишок(розчинені речовини),мг/дм3	1930
8	Жорсткість, мг-екв/дм3	19.99
9	Тимчасова жорсткість, мг-екв/дм3	12
10	Постійна жорсткість, мг-екв/дм3	7.99
11	Кальцій (Са2+), мг/дм3	188.59
12	Магній (Mg2+), мг/дм3	128.74
13	Натрій и калій (Na+ і K+), мг/дм3	215.283
14	Залізо (Fe2+, Fe3+), мг/дм3	0
15	Марганець (Mn2+), мг/дм3	0.71
16	Хлориди (Cl <sup>-</sup> ), мг/дм3	177.26
17	Сульфати (SO4 <sup>2-</sup> ), мг/дм3	526.36
18	Нітрати (NO3 <sup>-</sup> ) мг/дм3	86.77
19	Фосфати (PO4 <sup>3-</sup> ) мг/дм3	0.08
20	Перманганатна окислюваність, мгО/дм3	4.98
21	Біхроматна окислюваність мгО/дм3	
22	Нітрити (NO2 <sup>-</sup> ), мг/дм3	1
23	Амоній (азот амонійний, аміак), мг/дм3	0.3
24	Мідь (Cu2+), мг/дм3	0.11
25	Свинець (Pb2+), мг/дм3	0.006
26	Цинк. (Zn2+), мг/дм3	0.14
27	Сірководень	
28	Силікати	

Рисунок 4 - Вікно для генерації звітів та здійснення додаткових обчислень

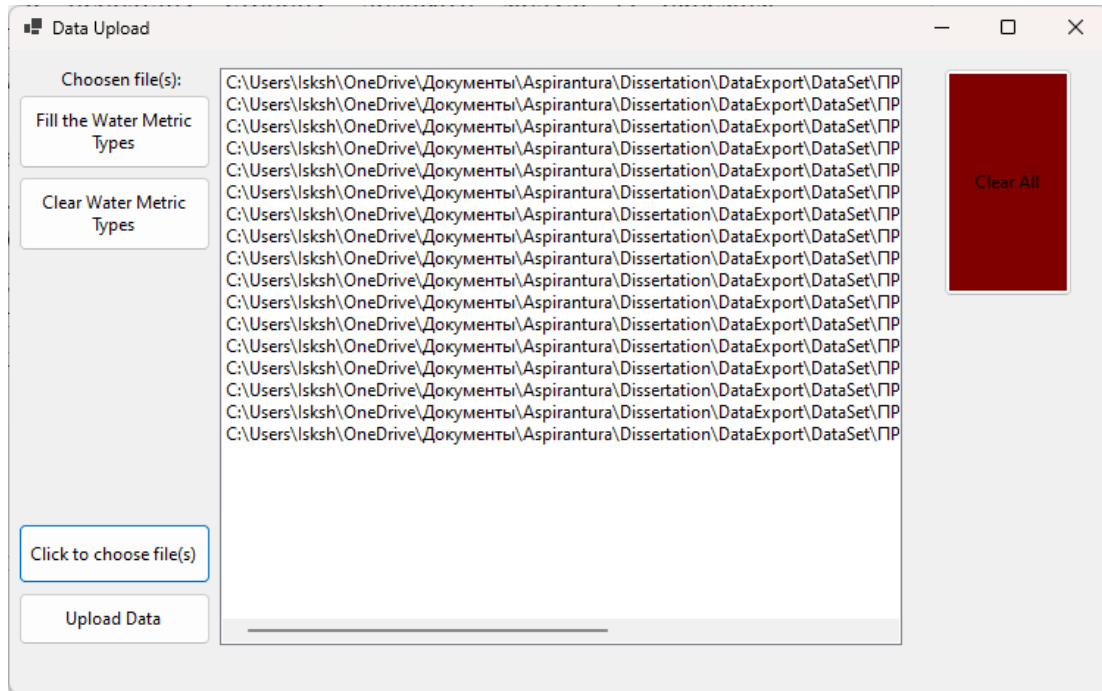


Рисунок 5 - Вікно для завантаження звітів в базу даних

Основний акцент цього рішення зроблено на автоматизованому зборі та збереженні великого обсягу даних. Фокус зроблено на обробці цієї інформації та автоматизації генерації гідрогеохімічних звітів. Інтегрований калькулятор забезпечує розрахунок гідрогеохімічних показників, оптимізуючи процес. Це дозволяє зробити висновки на основі точних розрахунків гідрогеохімічних показників.

Прикладом формули, яку було закладено в програмний застосунок, може бути формула вирахування натрію та калію за іншими показниками(1).

*equiv(CaNa)*

$$\begin{aligned}
 &= \text{equiv}(\text{equiv}(CL^-) + \text{equiv}(SO_4^{2-}) + \text{equiv}(NO_3^-) + \text{equiv}(PO_4^{3-}) \\
 &+ \text{equiv}(HCO_3^-)) \\
 &- \text{equiv}(\text{equiv}(Ca^{2+}) + \text{equiv}(Mg^{2+}) + \text{equiv}(Fe^+) + \text{equiv}(Mn^{2+})) \quad (1)
 \end{aligned}$$

Адаптивний дизайн інтерфейсу додатку забезпечує інтуїтивність використання, дозволяючи користувачам ефективно користуватись застосунком та адаптувати звітність до своїх потреб.

Автоматизовані розрахунки не лише підвищують швидкість обробки, але і забезпечують точність результатів і відсутність людського фактору.

Програмний застосунок є відображенням сучасних тенденцій в області інформаційних технологій та їх застосування в гідрогеохімії. Він демонструє, як технологічний розвиток може стати ефективним інструментом для наукових досліджень, розширюючи можливості аналізу. Загалом він торкається наступних сфер застосування:

– Автоматизований збір даних. Ця система дозволяє ефективно інтегрувати інформацію з різних джерел, таких як документи у файловому форматі. Цей підхід робить процес

менш витратним часом і знижує ймовірність появи помилок, пов'язаних з ручним введенням даних.

– Ефективна генерація звітів. Система включає інтегрований калькулятор для розрахунків гідрогеохімічних показників. Завдяки автоматизованому процесу формування, дослідники можуть ефективно представляти результати своєї роботи.

– Точність розрахунків. У світі, де точність є ключовим фактором успіху, автоматизовані розрахунки системи підтримують високий стандарт наукової точності. Це забезпечує надійність даних та допомагає уникнути потенційних помилок, пов'язаних з ручними розрахунками.

– Економія часу. Прискорення робочих процесів завдяки автоматизації збору даних, аналізу та звітності дозволяє дослідникам витратити менше часу на рутинні завдання і більше часу на власне наукове дослідження.

Перспективними напрямками для покращень цього технічного застосування та збільшення сфер використання є додавання таких модулів, як:

– Розширення можливостей прогнозування. Шляхом інтеграції математичних алгоритмів, алгоритмів машинного навчання та штучного інтелекту, програма може аналізувати історичні дані та робити прогнози щодо майбутнього стану води. Це може включати прогнозування ризиків забруднення, змін у хімічному складі та інших екологічних параметрів.

– Розвиток модулів глибокого навчання. Впровадження спеціалізованих модулів глибокого навчання дозволить обробляти складні набори даних, виявляючи неочевидні взаємозв'язки та закономірності.

– Глибокий аналіз даних. З використанням сучасних алгоритмів та методів аналізу, таких як кластерний аналіз, система зможе забезпечити змогу дослідникам виявляти складні закономірності та кореляції між різними наборами даних. Це посприє більш глибокому розумінню гідрогеохімічних процесів та їх впливу на навколишнє середовище.

**Висновки.** Розроблений програмний застосунок пришвидшує роботу із гідрогеохімічною звітністю, надає змогу вводити дані в зручному для використання інтерфейсі. Також він є достатньо гнучким для застосування і майбутніх покращень за рахунок модульної архітектури застосунок. На додачу до цього, звітність з належним форматуванням можна проаналізувати і зберегти дані в сховище даних для майбутнього використання.

Розроблений інструмент створює основу для оптимізації роботи з гідрогеохімічними даними. Хоча його первинна мета полягає в автоматизації рутинних завдань та забезпеченні більшої спрощеності обробки даних, він також створює платформу для майбутнього глибокого аналізу. Завдяки зручності зберігання та обробки інформації, науковці зможуть в майбутньому легше та ефективніше працювати з цими даними, виявляти нові тенденції та проводити комплексний аналіз.

З урахуванням постійного розвитку технологій та зростання потреб дослідницької спільноти, потенціал розширення та адаптації цього інструменту для інших областей є очевидним. Інноваційні рішення такого роду сприяють підвищенню ефективності наукової діяльності та стимулюють розвиток галузі гідрогеохімії.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Осика В. Ф., Кравченко М. С. Якість вимірювань складу та властивостей об'єктів довкілля та джерел їх забруднення: монографія //Київ: Наука. — 2001.
2. Iqbal J. et al. Hydrogeochemistry and prediction of arsenic contamination in groundwater of Vehari, Pakistan: comparison of artificial neural network, random forest and logistic regression models //Environmental Geochemistry and Health. — 2024. — Т. 46. — №. 1. — С. 1—25.
3. Uddin M. G. et al. Assessment of hydrogeochemistry in groundwater using water quality index model and indices approaches //Heliyon. — 2023. — Т. 9. — №. 9.
4. Bashir, E., et al. Shallow Groundwater Quality Assessment and Its Suitability Analysis for Drinking and Irrigation Purposes // Water. — 2021. — Т. 13. — №. 23.
5. AQUACHEM. [Електронний ресурс]. — Режим доступу: <https://www.aquachemme.com/>

## REFERENCES

1. Osika V. F., Kravchenko M. S. Quality of measurements of the composition and properties of environmental objects and their sources of pollution: monograph // Kyiv: auka. — 2001.
2. Iqbal J. et al. Hydrogeochemistry and prediction of arsenic contamination in groundwater of Vehari, Pakistan: comparison of artificial neural network, random forest and logistic regression models // Environmental Geochemistry and Health. — 2024. — Vol. 46. — No. 1. — P. 1—25.
3. Uddin M. G. et al. Assessment of hydrogeochemistry in groundwater using water quality index model and indices approaches // Heliyon. — 2023. — Vol. 9. — No. 9.
4. Bashir, E., et al. Shallow Groundwater Quality Assessment and Its Suitability Analysis for Drinking and Irrigation Purposes // Water. — 2021. — Vol. 13. — No. 23.
5. AQUACHEM. [Electronic resource]. — Access mode: <https://www.aquachemme.com/>

Received 10.06.2024.  
Accepted 20.06.2024.

### ***Development of software for automating calculations during the analysis of hydrogeochemical data***

*Analysis of recent research and publications. Modern research in the field of hydrogeochemistry is actively focused on using the latest technologies for analyzing and predicting water quality. One study[2] assessed the risks of arsenic contamination in groundwater in Vehari, Pakistan, using mathematic calculations to predict arsenic levels. Another study[3] dealt with assessing groundwater quality in Bangladesh using the water quality index. These and other studies highlight the growing need for automating data processing and implementing active use of software applications for calculations, reporting, and storing results for further groundwater analysis. Modern approaches to hydrogeochemical research include using software tools such as AQUACHEM[5] to facilitate data collection and analysis. However, such tools are often large corporate products that are not free, and their use by small laboratories and researchers may be impractical from a cost perspective.*

*Research purpose. The primary purpose of this article is to develop a software application for automating the processing of hydrogeochemical data and increasing calculations speed and time-spending efficiency during report preparation, as well as creating a flexible data storage system with extensive modification capabilities.*

*Presentation of the main research material. The developed software application consists of several key components:*

- *DataSource*. A class that defines the data source and provides methods for adding, deleting, retrieving, and modifying types of water metrics, as well as working with water quality protocols.
- *IDataSource*. An interface that defines the contract for the *DataSource* class, listing the methods that any class working as a data source must implement.
- *WaterQualityProtocolGeneratorUI*. A user interface class used to generate water quality reports. It contains methods for calculating certain fields, generating reports, and saving reports.
- *Mediator*. A class that acts as a mediator to ensure interaction between different system components.
- *IMathModule*. An interface that defines mathematical methods such as calculating bicarbonates and the calcium to sodium ratio.
- *MathModule*. A class that implements the *IMathModule* interface and contains the specified mathematical methods.
- *IReportGenerator*. An interface for generating reports with the *GenerateReport* method.
- *DocxReportGenerator* and *RtfReportGenerator*. Classes that implement the *IReportGenerator* interface for creating reports in *DOCX* and *RTF* formats, respectively.

The application supports modularity, allowing for the addition of new modules to extend functionality. For example, the report generator module is responsible for creating reports based on templates and saving them to the specified location on the disk. The data storage module manages historical measurements, enabling the generation of reports as needed and the development of new modules for data analysis and prediction.

*Conclusions:* The developed software application speeds up work with hydrogeochemical reporting, allowing data to be entered in a user-friendly interface. It is also flexible for application and future improvements thanks to its modular architecture. The formatted reports can be analyzed and stored in the database for further use.

The tool lays the foundation for optimizing work with hydrogeochemical data. Its primary goal is to automate routine tasks and simplify data processing, but it also creates a platform for in-depth analysis in the future. With the convenience of storing and processing information, scientists will be able to work more efficiently with the data, identify new trends, and conduct comprehensive analysis.

Given the constant development of technology and the growing needs of the research community, the potential for expanding and adapting this tool for other fields is quite high. Innovative solutions contribute to increasing the efficiency of scientific activities and stimulate the development of hydrogeochemistry.

**Охримчук Денис Дмитрович** - аспірант кафедри математичного забезпечення електронних обчислювальних машин (МЗ ЕОМ) Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Ємел'яненко Тетяна Георгіївна** - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри математичного забезпечення електронних обчислювальних машин (МЗ ЕОМ) Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Okhrymchuk Denys Dmytrovych** - Postgraduate student of the Department of Mathematical Support of Electronic Computing Machines (MS ECM) at Oles Honchar Dnipro National University.

**Yemelianenko Tetiana Heorhiivna** - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mathematical Support of Electronic Computing Machines (MS ECM) at Oles Honchar Dnipro National University.

## ОГЛЯД МЕТОДІВ СЕМАНТИЧНОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ ТЕКСТУ

*Аннотація:* У статті проведено аналіз методів класифікації тексту, таких як найвний байєс, логістична регресія, метод опорних векторів (SVM) з акцентом на сучасні методи глибокого навчання, включаючи штучні нейронні мережі (ANN), згорткові нейронні мережі (CNN), рекурентні нейронні мережі (RNN) та трансформери. Для оцінки використовується датасет відгуків про фільми IMDB. Дослідження порівнює ефективність цих методів у класифікації тексту за тональністю, враховуючи точність та обчислювальні ресурси. Мета роботи - визначити найкращий підхід для автоматизованої класифікації тексту та надати рекомендації для подальших досліджень.

*Ключові слова:* Класифікація тексту, Найвний Байєс, Логістична регресія, Метод опорних векторів (SVM), Штучні нейронні мережі (АНМ), Згорткові нейронні мережі (ЗНМ), Рекурентні нейронні мережі (РНМ), Трансформери, Аналіз тональності, обробка природної мови).

**Постановка проблеми.** Класифікація тексту є важливою складовою задачею, таких як аналіз настроїв, фільтрація спаму та організація документів. Традиційні методи, як найвний байєс, логістична регресія та метод опорних векторів (SVM), швидкі та ефективні, але їх продуктивність залежить від якості ознак. Методи машинного навчання, такі як дерева рішень та градієнтний бустинг, враховують складні закономірності, але потребують ретельного підбору параметрів.

Глибоке навчання, включаючи штучні нейронні мережі (ANN), згорткові нейронні мережі (CNN) та рекурентні нейронні мережі (RNN), автоматично виявляють складні патерни в текстових даних. Передові методи NLP, такі як трансформери, забезпечують високу точність і продуктивність у класифікації тексту. При цьому важливо зазначити, що сучасні підходи вимагають велику кількість обчислювальних ресурсів для донавчання та не завжди є оптимальним рішенням для певних задач.

Дослідження порівнює ефективність цих методів, визначаючи найкращий підхід для класифікації тексту. Використання сучасних методів глибокого навчання показує переваги в точності та продуктивності, що сприяє покращенню систем обробки текстів та надає напрямки для майбутніх досліджень.

**Мета дослідження.** Метою роботи є огляд методів автоматизованої класифікації тексту за ознакою тональності. Необхідно визначити точність передбачення тональності для різних моделей та проаналізувати отримані результати. Під час дослідження були розглянуті такі методи класифікації як Найвний Байєс, Support Vector Machines, Логістична Регресія та різні

імплементатії нейронних мереж. Такі методи як трансформери тексту не розглялися через високі системні вимоги (не вдалося провести навчання BERT та ELMo на локальному середовищі та у хмарному середовищі Google Colab).

**Дані для дослідження.** Для навчальної та тестувальної вибірки було використано датасет “IMDB Dataset of 50K Movie Reviews”[2]. Він включає у себе два стовпці:

- *Review* (огляд) - огляд фільму, за яким необхідно передбачити враження від перегляду. Представляє з себе текстові дані
- *Sentiment* (настрій, враження) - емоційне забарвлення відгуку, яке необхідно передбачити. Представляє з себе поле, що може мати два допустимі значення: *positive* та *negative*.

Таблиця 1

Перші 4 записи у датасеті “IMDB Dataset of 50K Movie Reviews”

review	sentiment
One of the other reviewers has mentioned that after watching just 1 Oz episode you'll be hooked. The...	positive
A wonderful little production.   The filming technique is very unassuming- very old-time-B...	positive
I thought this was a wonderful way to spend time on a too hot summer weekend, sitting in the air con...	positive
Basically there's a family where a little boy (Jake) thinks there's a zombie in his closet & his par...	negative

**Розробка програмного забезпечення.** Було використано мову програмування Python для імплементатії роботи моделей для машинного навчання.

Для візуалізації результатів дослідження роботу було виконано у формі документу Jupyter Notebook. Формат дозволяє суміщати HTML-розмітку на код на Python. Звіти з візуалізацією результатів та програмним кодом можна знайти за посиланням на GitHub-репозиторій[1].

**Завантаження даних.** Імпортуємо необхідні бібліотеки. Наступним кроком слід завантажити zip-архів с csv-датасетом за спеціальним посиланням та конвертувати у датафрейм (pandas.DataFrame) для подальшої роботи з даними[1].

#### Підготовка та аналіз датасету.

##### HTML-розмітка

Якщо поглянемо на табл. 1, то можемо побачити HTML-теги, а саме <br><br/>, у другому огляді фільму. HTML-розмітка не відіграє жодної ролі у семантичному аналізі, тому для моделей ця інформація буде шумовою. У такому випадку, видалимо HTML-теги з оглядів.

##### Регістр

Технічно між словом з маленької літери та словом з великої літери немає різниці з точки зору семантичного забарвлення, тому має сенс привести текст до одного регістру. Приведемо текст до нижнього регістру.

*Пунктуація*

Існують моделі, які здатні враховувати пунктуацію[3], але більш прості векторизатори, які ми розглянемо з початку. Враховуючи цей факт, можемо видалити пунктуацію з вхідних даних.

*Стоп-слова*

Для моделей, які не здатні розпізнавати граматичні зв'язки у реченнях, бажано видаляти так звані стоп-слова, які можуть вносити шум у вхідні дані. Часто у тексті зустрічаються слова без лексичного значення, такі як, наприклад, артиклі ("the", "a", "an"), сполучники ("and", "but", "or") або прийменники ("of", "to", "in"), тому їх видалення може сприяти більш високій точності класифікації[4].

*Стеммінг та лемматизація*

Як правило, стеммінг зводить слова до їх базової форми, знімаючи суфікси відповідно до набору правил, тоді як лемматизація розглядає граматичний контекст, щоб знайти словникову форму (лему) слова. Таким чином, два методи дозволяють захопити різні форми одного і того ж слова: стеммінг перетворить всі слова у "run"; наприклад, при застосуванні цієї техніки можна отримати "run" від "running" або "ran" від "runs" при використанні лематизації. Тим не менш, стеммінг може бути швидшим, ніж лематизація, хоча це може дати менш точні результати. У дослідженні розглянемо лематизацію, хоча у випадку, коли вхідних даних більше, стеммінг може бути більш придатним з огляду на обчислювальну ефективність[5].

*Бінарні ознаки*

Поле *Sentiment* приймає два значення, тому можемо трансформувати його у булеве, що й було зроблено.

Таблиця 2

Перші 4 записи у оновленому датасеті

review	sentiment
one reviewer mentioned watching 1 oz episode y...	1
wonderful little production filming technique ...	1
thought wonderful way spend time hot summer we...	1
basically there family little boy jake think t...	0

*Аналіз датасету*

Проведемо аналіз датасету за ознакою *Sentiment*.

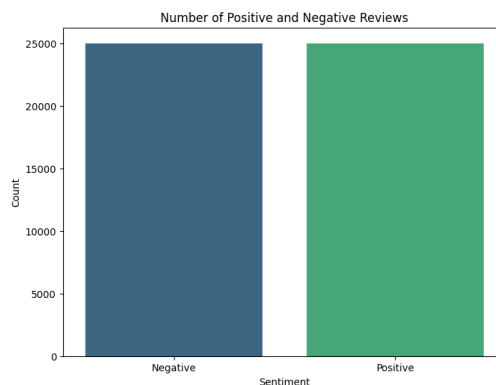


Рисунок 1 - Розподіл позитивних та негативних відгуків

Всього у датасеті 50000 записів. Як можна побачити на Рисунку 1, позитивні та негативні відгуки розподілені рівномірно, інаше кажучи, маємо по 25000 позитивних та негативних рецензій, тобто датасет є збалансованим.

**Векторизація.** Алгоритми машинного навчання не можуть працювати безпосередньо з сирим текстом. Проблема роботи з текстом у контексті обробки природної мови полягає в тому, що він є безладним з точки зору машини, і такі методи, як алгоритми машинного навчання, віддають перевагу добре визначеним вхідним даним фіксованої довжини (як, наприклад, числові вектори). Процес приведення тексту у зрозумілий машині вигляд називається *виведенням ознак* (англ. feature extraction). Допомогти з цією задачею можуть різноманітні алгоритми векторизації та більш передові трансформери тексту.

#### *Bag-of-Words (BoW)*

Bag-of-Words - це метод представлення тексту, який перетворює документ у вектор фіксованої довжини. У цьому методі текст розбивається на окремі слова, і кожне слово розглядається незалежно від інших. Вектор представляє кількість входжень кожного слова у документі, ігноруючи граматичні структури та порядок слів[6].

#### *TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency)*

TF-IDF - це метод зважування слів у документі, який використовується для оцінки важливості слова в контексті всього корпусу документів. TF (Term Frequency) вимірює частоту слова у документі, а IDF (Inverse Document Frequency) оцінює рідкість слова в наборі документів. Зважування TF-IDF зменшує вплив часто зустрічаються слів, підкреслюючи унікальні слова, які мають більше значення для конкретного документа[6].

#### *Word2Vec*

Word2Vec – це алгоритм для створення векторних уявлень слів, розроблений дослідниками Google у 2013 році. Він використовує нейронні мережі для навчання векторів слів на великих текстових корпусах, де слова з подібними контекстами мають схожі вектори. Існують дві основні моделі: Continuous Bag of Words (CBOW), яка передбачає слово на основі його контексту, та Skip-Gram, яка передбачає контекстні слова на основі цільового слова. Word2Vec значно покращив обробку природної мови (NLP), дозволяючи розпізнавати семантичні та синтаксичні зв'язки між словами[7]. Існує велика кількість попередньо тренуваних моделей, які можуть збільшити точність прогнозування[12].

**Огляд статистичних методів.** Для роботи з моделями текст попередньо обробляється (з використанням вищевказаних кроків; на останньому кроці надамо перевагу лемматизації, так як обсяг даних є відносно невеликим та різниця у часі у порівнянні зі стеммінгом не буде відчутною). Для роботи з моделями Наївний Байес, SCM та Логістичної Регресії вхідні дані векторизуємо з використанням TF-IDF. Також трансформуємо текст з використанням Word2Vec для SVM та Логістичної Регресії. Мультиноміальний наївний Байес не призначений для роботи з від'ємними значеннями, а нормалізація даних може шум у тестову вибірку. Також застосуємо Word2Vec, що був попередньо тренований на датасеті Google News (близько 100 мільярдів слів)[12]. Використання попередньо може вирішити проблему коли у тренувальній немає відповідного токена для тестової вибірки та збільшити точність прогнозування загалом за рахунок більш точних ваг для токенів.

### Наївний Байес

Наївний Байес - група алгоритмів класифікації даних за допомогою машинного навчання заснованих на теоремі Байеса. Включає у себе різні варіації алгоритми для класифікації тексту. Мультиноміальний Байес (Multinomial Naive Bayes) реалізує алгоритм Наївний Байес для мультиноміально розподілених даних. Враховуючи те, що взятий у роботу датасет включає у себе дві групи по 25000 зразків, можемо вважати дані збалансованими, тому розглянемо варіант використання Мультиноміального Наївного Байеса.

Алгоритм вирізняється простотою реалізації та високою ефективністю обчислень. Хоча, враховуючи факт, що алгоритм базується на припущенні про незалежність ознак, він є не зовсім підходящим для випадків коли є залежні ознаки. Висока ефективність обчислень дає можливість працювати з великими обсягами даних.

Розглянемо параметри для класифікатора:

***alpha***: Цей параметр задає величину згладжування Лапласа. Додає невелике фіктивне число до кожного підрахунку ознак у кожному класі. Допомогає запобігти перенавчанню, особливо коли кількість ознак велика, а кількість навчальних прикладів - мала.

Спробуємо перебрати значення: 0.1, 0.5, 1.0, 2.0, 5.0 (стандартне значення: 1.0).

***fit\_prior***: Цей параметр вказує, чи потрібно обчислювати апіорні ймовірності класів з навчальних даних.

Значення параметра:

**True**: Рекомендується, так як модель автоматично підлаштовується під розподіл класів у даних.

**False**: Може призвести до зміщення в бік поширеного класу.

Для збалансованих даних не відіграє великого значення.

Очікується, що для обох параметрів найкращі результати покажуть параметри за замовчуванням зважаючи на те, що датасет є збалансованим[8].

Розмір навчальної вибірки: Враховуючи, високу ефективність обчислень для даного алгоритму можемо використовувати досить велику навчальну вибірку. Розглянемо такі розбиття (0.95 означає, що 95% відводиться на навчальну вибірку, а решта - на тестову): 0.95, 0.9, 0.8, 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.01, 0.005, 0.001, 0.0005, 0.0001.

Результати перевірки:

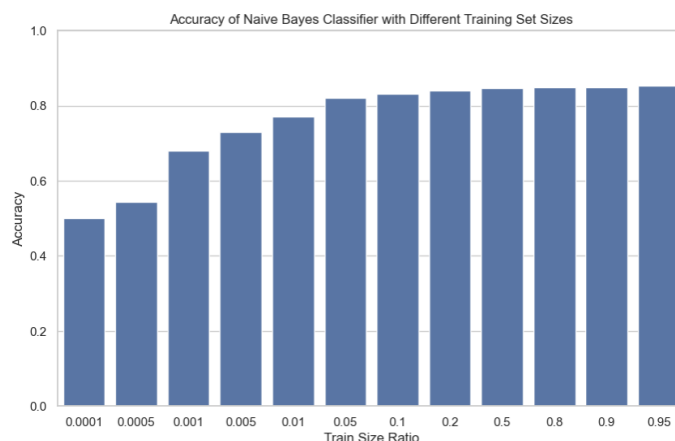


Рисунок 2 - Результати класифікації відгуків для алгоритму Наївний Байес

Як можемо побачити на Рисунку 2, починаючи з 5000-10000 зразків навчальної вибірки швидкість росту точності в залежності від розміру тренувальної вибірки зменшується і графік точності виходить на своєрідне плато. При значеннях навчальної вибірки менше 25 зразків точність дорівнює близько 50%, що фактично є вгадуванням наосліп.

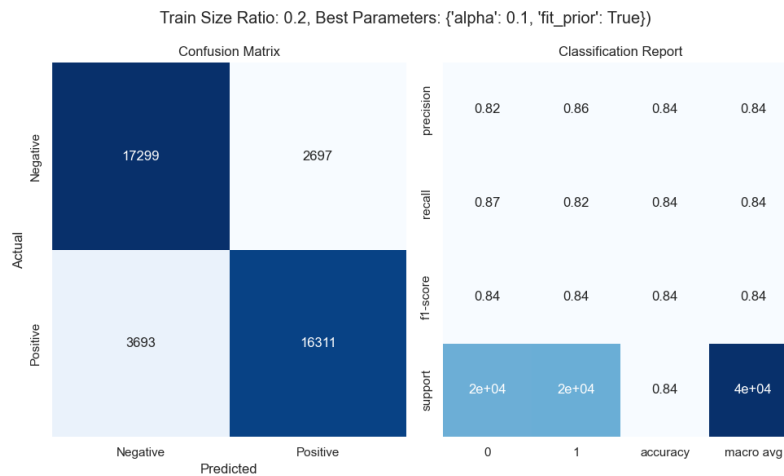


Рисунок 3 - Більш детальний звіт для алгоритму Наївний Байес

Як можемо побачити на Рисунку 3, точність передбачення дорівнює близько 84%. Найкращі результати показали параметри за замовчуванням (alpha: 0.1, fit\_prior: true).

Продуктивність: Підбір параметрів, який включав у себе кросс-валідацію з різними наборами параметрів на вказаних вибірках зайняв близько 5 хвилин. Враховуючи відносно високу точність класифікації починаючи з тренувальної вибірки у 5000-10000 тисяч зразків, у реальних умовах застосування час навчання моделі є несуттєвим, особливо у порівнянні з багатьма іншими моделями.

Попередні висновки: При навчанні на вибірці з 10000 зразків точність склала 84%. При використанні 47500 зразків точність склала 85%, що не є надто суттєвим ростом. Існує не надто багато способів для налаштування алгоритму, хоча він дозволяє запобігти перенавчанню та працювати з незбалансованими даними при використанні налаштовуваних параметрів. В цілому, алгоритм придатний для класифікації тексту, особливо якщо навчальна вибірка має великий обсяг, а обчислювальні потужності обмежені.

### Support Vector Machines

Support Vector Machines (SVM) використовується для класифікації текстових даних шляхом знаходження оптимальної гіперплощини, яка розділяє дані різних класів з максимальним проміжком. SVM може бути застосований для задач класифікації тексту, таких як визначення тональності тексту, завдяки здатності працювати у високорозмірних просторах ознак.

C: Параметр регуляризації, що контролює баланс між максимізацією зазору та мінімізацією помилки класифікації. Низькі значення C роблять модель більш гнучкою (висока регуляризація), тоді як високі значення C зменшують регуляризацію, роблячи модель більш суворою. Моделі з високим значенням цього параметру можуть мати схильність до перенавчання. Приклади значень: [0.01, 0.1, 1, 10, 100].

**gamma:** Коефіцієнт для ядер, що визначає "радіус впливу" однієї навчальної точки. Актуальний для RBF, поліноміальних та сигмоїдальних ядер. Високі значення gamma призводять до моделі з високим перенавчанням, а низькі значення роблять модель більш гладкою і узагальненою. Приклади значень: ['scale', 'auto', 1, 0.1, 0.01, 0.001, 0.0001].

**kernel:** Функція ядра визначає спосіб перетворення вхідних даних у більш високий простір ознак. Основні типи ядер:

- 'linear': Лінійне ядро, підходить для лінійно роздільних даних.
- 'poly': Поліноміальне ядро, корисне для складних нелінійних взаємозв'язків.
- 'rbf': Ядро радіальної базисної функції, добре моделює складні нелінійні межі.
- 'sigmoid': Сигмоїдальне ядро, аналог нейронних мереж із сигмоїдальною функцією активації.

Серед недоліків зазвичай згадується вразливість до шумових даних та вибагливість до обчислювальних ресурсів. У випадку роботи з десятками тисяч зразків зразків рекомендується використовувати лінійне ядро[9].

Розмір навчальної вибірки: Враховуючи, вибагливість обчислень для даного алгоритму, маємо певні обмеження по розміру вибірки. Розглянемо такі розбиття: 0.5, 0.1, 0.05, 0.01, 0.005, 0.001, 0.0005.

Результати перевірки:

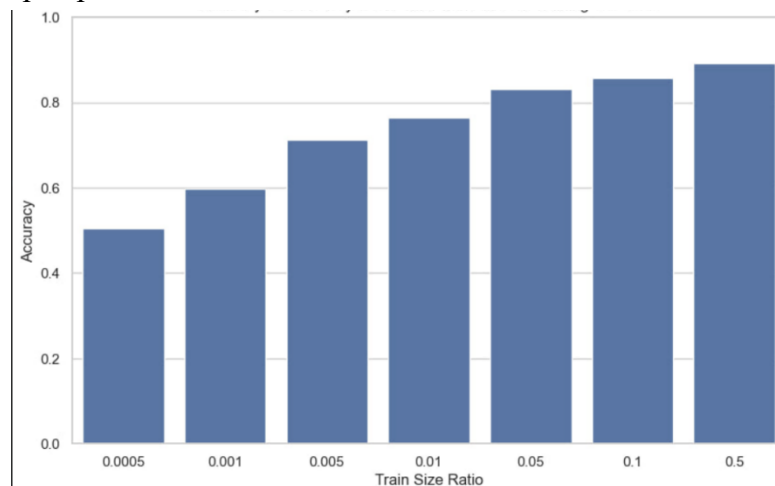


Рисунок 4 - Результати класифікації відгуків для алгоритму SVM

На Рисунку 4 можемо побачити, що точність суттєво збільшується зі збільшенням навчальної вибірки (25 зразків - 50% (фактично, вгадування наосліп), 50 зразків - 60%, 250 зразків - 71%, 500 зразків - 76%, 2500 зразків - 83%, 5000 зразків - 86%, 25000 зразків - 89%).

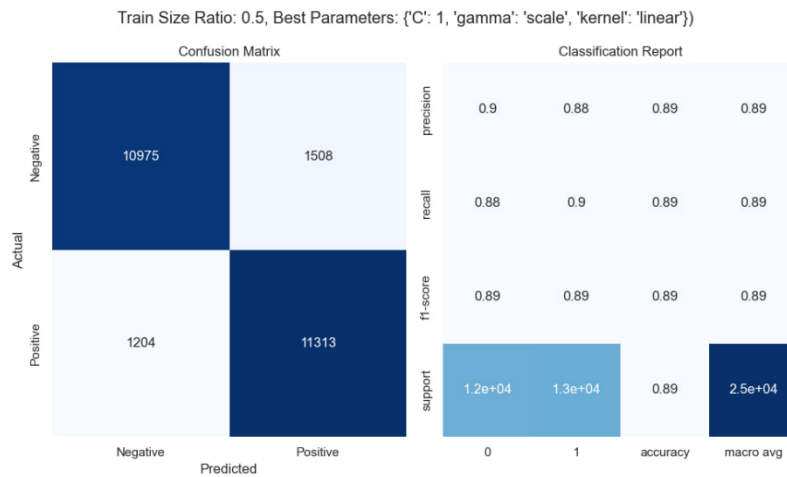


Рисунок 5 - SVM з TF-IDF та оптимальний набір параметрів моделі

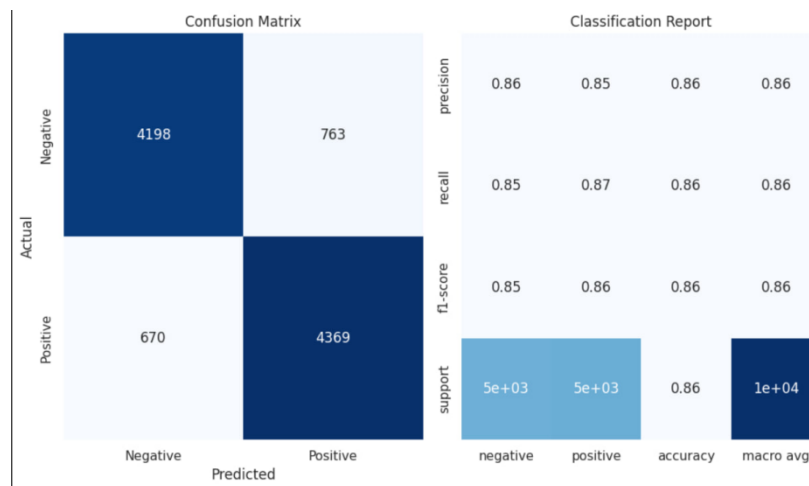


Рисунок 6 - SVM з Word2Vec



Рисунок 7 - SVM з попередньо натренованим Word2Vec

На Рисунку 5 можемо побачити оптимальний набір параметрів для заданої вибірки. Результати можуть відрізнятися від характеру текстових даних, але загалом рекомендується

використовувати лінійне ядро у випадку великої кількості даних задля економії часу та обчислювальних потужностей.

Висновки: При використанні TF-IDF вдалося досягти точності прогнозування у 89% (Рисунок 5); 86% для Word2Vec (Рисунок 6) та 85% для попередньо натренованого Word2Vec (Рисунок 7); підбір параметрів для навчальних вибірок різного розміру зайняв близько 160 хвилин.

### Логістична регресія

Логістична регресія є статистичним методом для аналізу набору даних, у якому одна або кілька незалежних змінних визначають результат. Вона використовується для задач класифікації, де цільова змінна є бінарною (наприклад, позитивна або негативна тональність тексту). Логістична регресія моделює ймовірність того, що конкретний зразок належить до певного класу, використовуючи логістичну функцію (сигмоїдну).

C: параметр регуляризації, який визначає силу регуляризації. Низькі значення C вказують на сильну регуляризацію, тоді як високі значення зменшують регуляризацію. Приклади значень: [0.01, 0.1, 1, 10, 100].

penalty: тип регуляризації, яка застосовується до моделі для запобігання перенавчанню. Приклади значень: ['l1', 'l2', 'elasticnet'(комбінація l1 та l2)][11].

solver: алгоритм оптимізації, який використовується для пошуку оптимальних параметрів моделі. Приклади значень: ['newton-cg', 'lbfgs', 'liblinear', 'sag', 'saga'].

max iter: максимальна кількість ітерацій, що використовуються алгоритмом для збіжності. Приклади значень: [100, 200, 500].

l1 ratio: параметр для балансування між L1 та L2 регуляризаторів для ElasticNet[10][11].

Розмір навчальної вибірки: Алгоритм є менш витратним ніж SVM[10]. Розглянемо такі розбиття: 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.01, 0.005, 0.001, 0.0005, 0.0001.

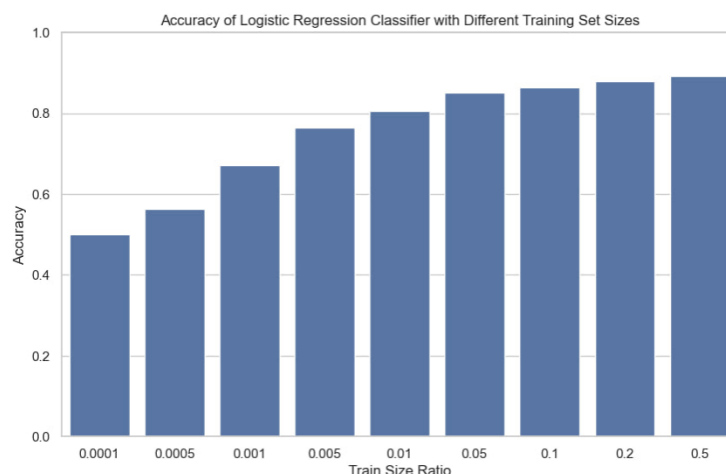


Рисунок 9 - Результати класифікації для Логістичної регресії

На Рисунку 7 можемо побачити, що точність суттєво збільшується зі збільшенням навчальної вибірки (5 зразків - 50%, 25 зразків - 58%, 50 зразків - 67%, 250 зразків - 76%, 500

зразків - 81%, 2500 зразків - 85%, 5000 зразків - 86%, 10000 зразків - 88%, 25000 зразків - 89%).

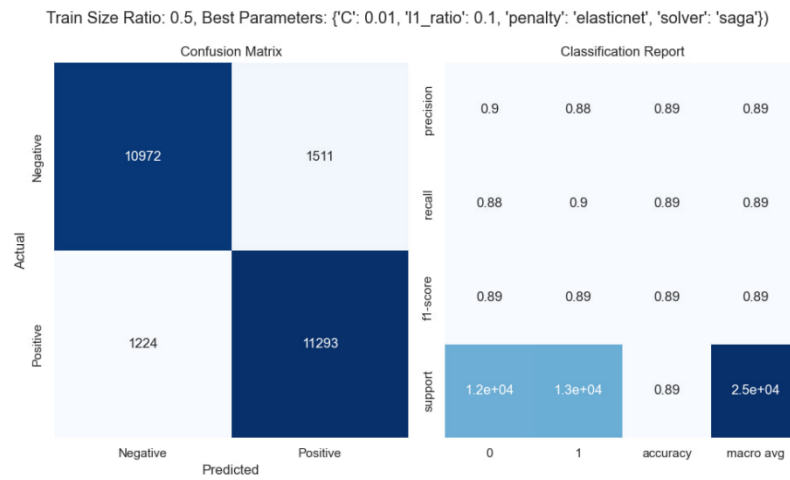


Рисунок 10 - Результати для Логістичної Регресії з ElasticNet регуляризацією

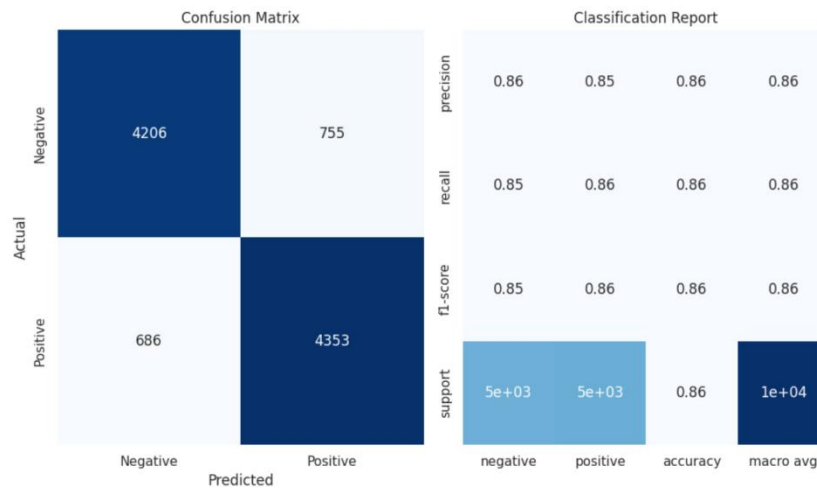


Рисунок 11 - Результати для Логістичної Регресії з Word2Vec

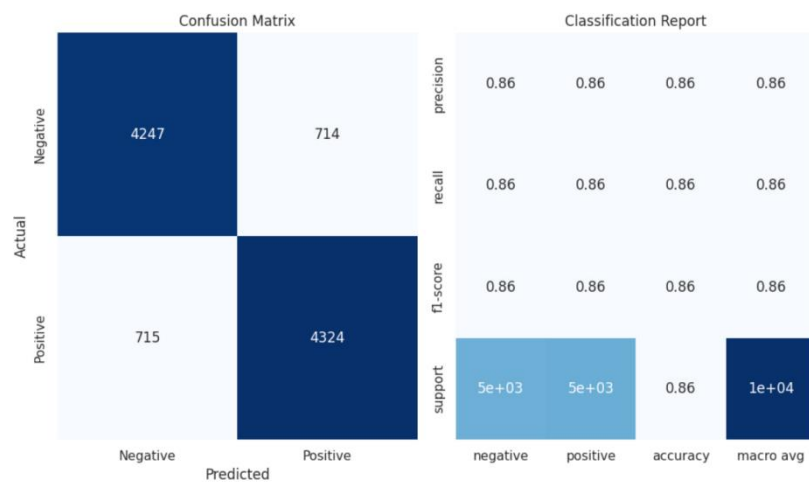


Рисунок 12 - Результати для логістичної регресії з попередньо натренованим Word2Vec

Висновки: При використанні TF-IDF вдалося досягти точності прогнозування у 89% (Рисунок 10); 86% для Word2Vec (Рисунок 11) та 86% для попередньо натренованого Word2Vec (Рисунок 12); підбір параметрів для навчальних вибірок різного розміру зайняв близько 20 хвилин.

#### *Загальні висновки*

При класифікації тексту з використанням TF-IDF та моделей Naive Bayes, SVM та Logistic Regression найкраща точність була досягнута з використанням моделей SVM та Logistic Regression (89% при розбитті навпіл на навчальну та тестову вибірки). Модель Naive Bayes продемонструвала теж прийнятні результати, але показника точності вище 84-85% досягти не вдалося. При використанні моделі Word2Vec точність передбачення при задіяних 80% вибірки для навчання склала 86%. Для SVM та Logistic Regression метрики виявилися дуже схожими. Подібні результати були продемонстровані Word2Vec попередньо тренуваному на вибірці з Google News (точність для Логістичної Регресії: 86%, для SVM: 85%). Вірогідно, проблема полягає у не стільки у обмеженому об'ємі словника, скільки у необхідності роботи з контекстом та розпізнаванні текстових патернів.

**Нейронні мережі.** Розглядаємо три типи нейронних мереж для задачі класифікації тексту: штучні нейронні мережі (ANN), згорткові нейронні мережі (CNN) та рекурентні нейронні мережі (RNN) з використанням LSTM. Для кожної моделі ми описали використані параметри та налаштування, пояснили причини їх вибору та провели короткий огляд.

#### *Короткий огляд*

Artificial Neural Networks (ANN): ANN складаються з шарів нейронів, кожен з яких з'єднаний з нейронами наступного шару. Вони підходять для базових задач класифікації тексту, але можуть не враховувати порядок слів у тексті, що обмежує їх ефективність у складніших задачах .

Convolutional Neural Networks (CNN): CNN використовують згорткові шари для виділення локальних ознак тексту, таких як фрази або n-грами. Вони добре підходять для задач, де важливі локальні залежності між словами, але можуть не враховувати далекі залежності у тексті .

Recurrent Neural Networks (RNN) з LSTM: RNN з LSTM-шарами дозволяють моделі враховувати послідовність та залежності між словами у тексті. Вони ефективні для задач, де важливий контекст і порядок слів, що робить їх найкращими для обробки послідовних даних.

#### *Підготовка даних*

При класифікації тексту з використанням методів глибокого навчання видалення стоп-слів може негативно вплинути на якість класифікації через втрату граматичних зв'язків у реченнях.

Використаємо токенизатор для роботи з даними. Його принцип роботи полягає у перетворенні слів у числові токени, а тексти, в свою чергу, у вектори з цих чисел. Попередньо текст приводиться до нижнього регістру, видаляються символи пунктуації та спеціальні символи [13].

Крім того, слід додати значення «0» у кінець векторів (або у початок) для того щоб привести усі вектори до однакової довжини (довжини найдовшого вектора)[13].

*Методика*

Artificial Neural Network (ANN):

Модель ANN була побудована зі наступними шарами:

Embedding Layer: Використано шар embedding з розмірністю 256, щоб перетворити текстові дані у вектори фіксованої розмірності. Це дозволяє моделі ефективно працювати з текстом.

Flatten Layer: Було додано шар Flatten для перетворення багатовимірних виходів шару embedding в одновимірний вхід для повнозв'язних шарів.

Dense Layers: Використано два повнозв'язні шари з 128 та 64 нейронами відповідно та функцією активації ReLU для навчання складним нелінійним взаємозв'язкам у даних.

Dropout Layers: Було додано два шари Dropout з параметром 0.5 для запобігання пере-навчанню шляхом випадкового вимикання нейронів під час навчання.

Output Layer: Використано вихідний шар з 1 нейроном та функцією активації sigmoid для бінарної класифікації.

Convolutional Neural Network (CNN)

Модель CNN складалася з наступних шарів:

Embedding Layer: Використано шар embedding з розмірністю 128 для перетворення тексту у вектори фіксованої розмірності.

Conv1D Layer: Було додано згортковий шар з 128 фільтрами та розміром фільтра 5 для виділення локальних ознак тексту. Функція активації ReLU забезпечує нелінійність.

GlobalMaxPooling1D Layer: Використано глобальне підсумовування для зменшення розмірності виходу з згорткового шару, вибираючи максимальне значення з кожного фільтра.

Dense Layer: Додано повнозв'язний шар з 64 нейронами та функцією активації ReLU для класифікації на основі виділених ознак.

Output Layer: Використано вихідний шар з 1 нейроном та функцією активації sigmoid для бінарної класифікації.

Recurrent Neural Network (RNN) з LSTM:

Модель RNN з LSTM включала такі шари:

Embedding Layer: Використано шар embedding з розмірністю 256 для перетворення текстових даних у вектори фіксованої розмірності.

LSTM Layer: Було додано LSTM-шар з 256 нейронами для обробки послідовностей та врахування залежностей між елементами тексту.

Dense Layers: Використано два повнозв'язні шари з 128 та 64 нейронами відповідно та функцією активації ReLU для навчання складним нелінійним взаємозв'язкам у даних.

Dropout Layers: Було додано два шари Dropout з параметром 0.5 для запобігання пере-навчанню.

Output Layer: Використано вихідний шар з 1 нейроном та функцією активації sigmoid для бінарної класифікації.

Для кожної моделі було проведено навчання та оцінку на тестовій вибірці з наступними налаштуваннями:

Було обрано оптимізатор Adam та функцію втрат binary\_crossentropy для швидкої і стабільної конвергенції.

EarlyStopping: Використано callback EarlyStopping з моніторингом показника 'val\_accuracy', patience=2 та mode='max' для зупинки навчання, коли покращення точності на валідаційній вибірці зупиняється, щоб уникнути перенавчання.

*Результати:*

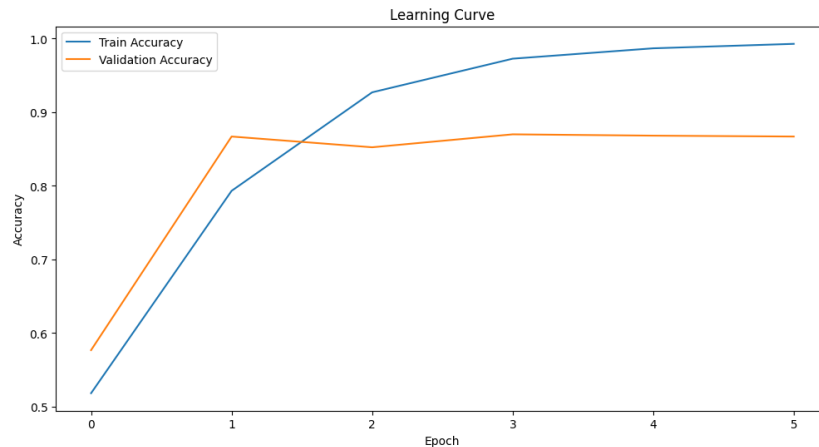


Рисунок 13 - Крива навчання для ANN

Таблиця 3

Звіт для ANN

Class	Precision	Recall	F1-score	Support
0	0.85	0.86	0.85	12500
1	0.86	0.85	0.85	12500
accuracy	0.85	0.85	0.85	12500
macro avg	0.85	0.85	0.85	12500
weighted avg	0.85	0.85	0.85	12500

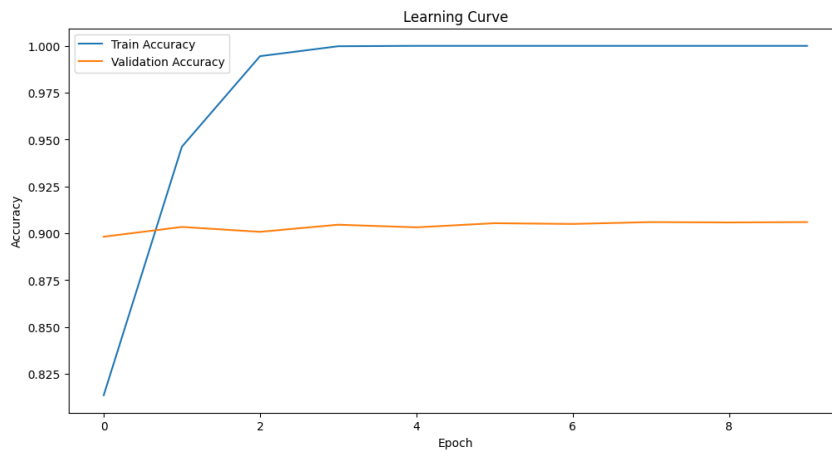


Рисунок 15 - Крива навчання для CNN

Звіт для CNN

Class	Precision	Recall	F1-score	Support
0	0.90	0.90	0.90	12500
1	0.90	0.90	0.90	12500
accuracy	0.90	0.90	0.90	12500
macro avg	0.90	0.90	0.90	12500
weighted avg	0.90	0.90	0.90	12500

На Рисунок 13 можемо побачити схожу тенденцію зменшення похибки на тренувальних і тестових наборах. Починаючи з 6 епохи модель почала демонструвати ознаки перенавчання, тому на епісі 8 навчання було зупинено. Точність прогнозування склала 90%.

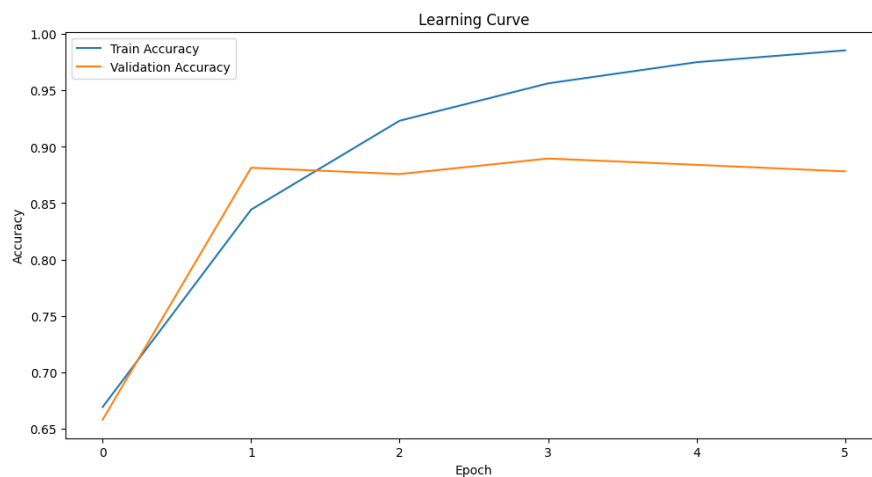


Рисунок 17 - Крива навчання для RNN

Звіт для RNN

Class	Precision	Recall	F1-score	Support
0	0.87	0.86	0.86	12500
1	0.86	0.87	0.87	12500
accuracy	0.87	0.87	0.87	12500
macro avg	0.87	0.87	0.87	12500
weighted avg	0.87	0.87	0.87	12500

На кривих навчання (Рисунок 13, Рисунок 15, Рисунок 17) можемо побачити схожу тенденцію зменшення похибки на тренувальних і тестових наборах. Починаючи з певної епохи (ANN: 3, CNN: 6, RNN: 3) моделі почали демонструвати ознаки перенавчання, тому двома епохами пізніше навчання було зупинено. Точність прогнозування для ANN склала 90%, для CNN - 90% та 87% для RNN, відповідно.

*Висновки:*

- CNN показала найкращі результати за всіма показниками, що вказує на високу здатність розпізнавати особливості вхідних даних, де важлива локальна структура.
- RNN показує кращі результати ніж ANN, що може бути корисним у випадках з послідовними даними, такими як текст у тому числі.
- ANN має найнижчу точність, але все ще є ефективною у випадках з менш складними даними.

**Висновки.** З дослідження можемо зробити висновок, що за допомогою статичних методів та нейронним мережам можливо досягти точності прогнозування близько 90 відсотків без значних обчислювальних витрат та витрат часу на навчання класифікатора. Такі методи як Логістична Ресресія, CNN та RNN мають широкі простір для налаштування параметрів та можуть бути підлаштовані для різноманітних задач. Якщо є бізнес-вимога у вищій точності прогнозування, то, можливо, є сенс у використанні трансформерів та LLM (Large Language Model). При цьому має місце аспект наявності необхідних обчислювальних потужностей та економічної доцільності використання Open API від LLM (GPT-3.5 Turbo, GPT-4 та інші).

#### ЛІТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Source Code for the Article. URL: <https://github.com/w3t4nu5/NLP-Article>
2. IMDB Dataset of 50K Movie Reviews. URL: <https://www.kaggle.com/datasets/lakshmi25npathi/imdb-dataset-of-50k-movie-reviews>
3. HuggingFace: Transformers. URL: <https://huggingface.co/docs/transformers/index>
4. Stopwords [NLP, Python]. URL: <https://medium.com/@yashj302/stopwords-nlp-python-4aa57dc492af>
5. Pavliuk, D. I., Baibuz, O. H., and Honcharova, Y. S. "Text Preparation for Natural Language Processing." 'XIX International Scientific and Practical Conference "Creative Business Management and Implementation of New Ideas"', 14-17 May 2024, Tallinn, Estonia, pp. 223-225.
6. Feature extraction. URL: [https://scikit-learn.org/stable/modules/feature\\_extraction.html#text-feature-extraction](https://scikit-learn.org/stable/modules/feature_extraction.html#text-feature-extraction)
7. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. 2013. URL: <https://arxiv.org/pdf/1301.3781>
8. MultinomialNB. URL: [https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.naive\\_bayes.MultinomialNB.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.naive_bayes.MultinomialNB.html)
9. Support Vector Machines. URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/svm.html>
10. LogisticRegression. URL: [https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear\\_model.LogisticRegression.html](https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.linear_model.LogisticRegression.html)

11. Elastic Net Regression —Combined Features of L1 and L2 regularization. URL: <https://medium.com/@abhishekjainindore24/elastic-net-regression-combined-features-of-l1-and-l2-regularization-6181a660c3a5>
12. Google Code: word2vec. URL: <https://code.google.com/archive/p/word2vec/>
13. Natural Language Processing in TensorFlow. URL: <https://www.coursera.org/learn/natural-language-processing-tensorflow/home/week/1>

Received 17.06.2024.  
Accepted 21.06.2024.

### ***Review of methods for semantic text classification***

*Recent advancements in text classification have focused on the application of machine learning and deep learning techniques. Traditional methods such as Naive Bayes, Logistic Regression, and Support Vector Machines (SVM) have been widely utilized due to their efficiency and simplicity. However, the advent of deep learning has introduced more complex models like Artificial Neural Networks (ANN), Convolutional Neural Networks (CNN), and Recurrent Neural Networks (RNN), which can automatically extract features and detect intricate patterns in textual data. Additionally, transformer-based models such as BERT have set new benchmarks in text classification tasks. Despite their high accuracy, these models require substantial computational resources and are not always practical for every application. The ongoing research aims to balance accuracy and computational efficiency.*

*Purpose of Research. The primary objective of this study is to review and compare various methods for automated text classification based on sentiment analysis. This research aims to evaluate the prediction accuracy of different models, including traditional machine learning algorithms and modern deep learning approaches, and to provide insights into their practical applications and limitations.*

*Presentation of the Main Research Material. This study utilizes the “IMDB Dataset of 50K Movie Reviews” to train and test various text classification models. The dataset comprises movie reviews and their associated sentiment labels, either positive or negative. The research employs several preprocessing steps. For feature extraction, methods such as Bag-of-Words (BoW), TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency), and Word2Vec are used. These features are then fed into various classifiers: Naive Bayes, Support Vector Machines (SVM), Logistic Regression, Deep Learning Models.*

*Conclusions. The comparative analysis reveals that while traditional machine learning methods like Naive Bayes, SVM and Logistic Regression are efficient and easy to implement, deep learning models offer superior accuracy by capturing more complex patterns in the data. However, the computational demands of deep learning models, particularly transformers, limit their applicability in resource-constrained environments. Future research should focus on optimizing these models to balance accuracy and computational efficiency, making advanced text classification accessible for a broader range of applications.*

*Recent advancements in text classification have focused on the application of machine learning and deep learning techniques. Traditional methods such as Naive Bayes, Logistic Regression, and Support Vector Machines (SVM) have been widely utilized due to their efficiency and simplicity. However, the advent of deep learning has introduced more complex models like Artificial Neural Networks (ANN), Convolutional Neural Networks (CNN), and Recurrent Neural Networks (RNN),*

*which can automatically extract features and detect intricate patterns in textual data. Additionally, transformer-based models such as BERT have set new benchmarks in text classification tasks. Despite their high accuracy, these models require substantial computational resources and are not always practical for every application. The ongoing research aims to balance accuracy and computational efficiency.*

**Павлюк Дмитро Іванович** – аспірант 1-го року навчання Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Байбуз Олег Григорович** - доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри математичного забезпечення ЕОМ Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Pavliuk Dmytro** - postgraduate student of the 1st year of study at the Dnipro National University named after Oles Honchar.

**Baibuz Oleh** - doctor of technical sciences, professor, head of the department of computer mathematical support of Dnipro National University named after Oles Honchar.

## МЕТОД СИНХРОНІЗАЦІЇ ТЕМПОРАЛЬНИХ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ДАНИХ ДЛЯ СТВОРЕННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА ГОРТАНІ

*Анотація.* У статті запропоновано метод синхронізації темпоральних мультимодальних даних, який призначено для створення та оптимізацію цифрових двійників гортані людини. Метод надає можливість інтеграції діагностичних даних відеоларингостробоскопії та акустичного аналізу голосу для створення точної 3D-моделі гортані, яка відтворює фізіологічні характеристики та голосову функцію пацієнта. У статті описано метод, заснований на глибокому навчанні, який забезпечує точне вирівнювання часових маркерів фаз голосоутворення на всіх типах даних, відображаючи деталізовану біомеханіку гортані в динаміці. Результати дослідження свідчать про підвищення точності цифрового двійника. Застосування цифрового двійника гортані покликано спростити планування хірургічних втручань та інших лікувальних заходів.

*Ключові слова:* інженерія програмного забезпечення, програмне забезпечення, цифровий двійник, 3D-моделювання, синхронізація даних, відеоларингостробоскопія, акустичний аналіз, біомеханіка голосового апарату, персоналізована медицина.

**Постановка проблеми.** Створення цифрового двійника гортані є складним завданням, яке вимагає точної інтеграції різноманітних мультимодальних даних для відтворення реалістичної біомеханіки та функціональності голосового апарату. Проблема полягає у синхронізації даних, що вимірюються у різний час, надходять з різних джерел, і в різних умовах. Зокрема, у дослідженні, результати якого представлені у цій статті, вирішується задача синхронізації відеозаписів фоніації голосу та акустичних записів. Ці діагностичні дані повинні бути взаємозамінними, що дає змогу моделювати динамічні зміни у гортані під час голосоутворення. Перша складність полягає в обмеженій точності традиційних методів синхронізації, які не враховують індивідуальні варіації в анатомії та фізіології гортані. Друга – у необхідності розроблення програмних засобів, які здатні обробляти великі обсяги даних в реальному часі з високою пропускну здатністю та мінімальною помилкою. Третя – у створенні уніфікованої моделі, яка може адаптуватися до змін у фізіологічних даних пацієнта протягом часу, включаючи зміни в голосі через захворювання або вікові зміни. Ці проблеми вимагають нового підходу до обробки та аналізу даних, що передбачає використання передових технік машинного навчання для виявлення складних шаблонів в темпоральних та просторових характеристиках мультимодальних даних. Результатом дослідження має стати розроблення алгоритмічно-програмного методу, за допомогою якого можна забезпечити високу точність синхронізації темпоральних даних, які надходять з різних джерел, для створення інтегрованої і динамічної індивідуальної моделі гортані пацієнта.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сфера моделювання медико-біологічних об'єктів відзначається швидким розвитком [1]. Однак, попри прогрес, задачі, пов'язані з точною синхронізацією даних різних модальностей, залишаються актуальними. Останні дослідження зі синхронізації мультимодальних даних демонструють важливість розроблення більш комплексних та інтегрованих систем, які можуть об'єднувати структурну, функціональну та біомеханічну інформацію [2]. Останні публікації з комп'ютерної томографії та магнітно-резонансної томографії зосереджені на підвищенні деталізації зображень, що дає змогу точніше визначити мікроструктури гортані [3]. У той же час, дослідження у галузі фоніатрії та ларингології акцентують важливість точного відтворення фізіологічних процесів голосоутворення. Так, інноваційні методи акустичного аналізу, такі як високошвидкісна відеоларингостробоскопія, використовуються для вивчення динаміки голосових зв'язок [4]. Синергія цих досліджень з передовими технологіями обробки зображень, такими як машинне навчання, дає змогу створювати детальні цифрові моделі гортані, що імітують реальні фізіологічні процеси. Однак, існує брак досліджень, які б зосереджувались на інтеграції даних різних модальностей у єдиний потік темпоральних даних [5], що необхідно для створення точних і динамічних цифрових двійників медико-біологічних об'єктів, зокрема гортані. Інформація про алгоритми та програмне забезпечення з вказаної галузі поки що доволі поверхнево висвітлена у наукових працях. Таким чином, рівень технологічного розвитку цієї галузі, згідно з індексом технологічної готовності ТЮВЕ [6], перебуває на етапі розроблення прототипів. Це визначає актуальність створення нових алгоритмів та методів обробки даних, які брали б до уваги специфічні темпоральні характеристики та динаміку руху голосових зв'язок. Потреба у такому підході є особливо нагальною, оскільки вона може відкрити нові можливості для діагностики, хірургічного планування та реабілітації після операцій на гортані. В огляді літератури [7] зазначається, що незважаючи на значний прогрес у сегментації медичних зображень і аналізі голосу, залишається прогалина у дослідженнях, присвячених синхронізації цих мультимодальних даних. Наявні методи синхронізації часто вимагають ручного втручання або не враховують всіх аспектів біомеханіки голосоутворення, що обмежує їхнє застосування у клінічній практиці. З огляду на ці проблеми, необхідність розроблення вдосконаленого методу синхронізації, який би використовував переваги машинного навчання, є важливою для підвищення точності та ефективності цифрових двійників гортані. Такий метод має допомогти не тільки вдосконалити створення моделей, але й прискорити процес впровадження цих технологій у клінічну практику, сприяючи розвитку персоналізованої медицини і значно покращуючи результати лікування пацієнтів з порушеннями голосу.

**Мета досліджень.** Головною метою дослідження, результати якого представлені у цій статті, є розроблення та експериментальна перевірка комплексного методу синхронізації темпоральних мультимодальних даних, які використовуються для створення і точної візуалізації цифрового двійника гортані. Основні завдання дослідження включають:

- аналіз відомих методів синхронізації даних і виявлення їхніх обмежень у контексті моделювання гортані;
- розроблення методу інтегрування динамічних зображень з відеоларингостробоскопії та акустичні дані голосу в єдиний потік темпоральних даних;
- використання методів машинного навчання для автоматизації процесу синхронізації і зменшення помилок, пов'язаних із людським фактором;

– адаптація моделі до індивідуальних особливостей пацієнтів для підвищення точності діагностики та ефективності лікувальних втручань.

Практичним результатом досягнення цієї мети має стати підвищення ефективності діагностичних та терапевтичних методів у ларингології та фоніатрії, сприяння розвитку персоналізованої медицини та покращення якості життя пацієнтів із порушеннями голосу.

**Викладення основного матеріалу досліджень.** У контексті створення цифрового двійника гортані аналіз мультимодальних даних відіграє ключову роль. Джерела даних включають комп'ютерну томографію, магнітно-резонансну томографію, відеоларингостробоскопію та акустичний аналіз голосу [8]. Кожне з цих джерел надає унікальний вимір структури та функціонування гортані. Найбільш поширеними способами діагностики гортані є відеоларингостробоскопія та акустичний аналіз голосу. Дослідження, результати якого наведені у цій статті, ґрунтуються саме на цих діагностичних способах, які полягають у наступному.

*Відеоларингостробоскопія* використовується для візуального аналізу та оцінки динамічних характеристик голосових зв'язок під час фонації, забезпечуючи візуальне уявлення про механіку голосоутворення.

*Акустичний аналіз* дозволяє аналізувати характеристики голосу, як-от частота, амплітуда, та тембр, що необхідно для відтворення реалістичної моделі голосу.

Для вирішення проблем, пов'язаних із синхронізацією відеоданих з відеоларингостробоскопії та аудіоданих з акустичного аналізу, пропонується метод, який ґрунтується на комбінованому використанні крос-кореляції та машинного навчання. Цей підхід дає змогу автоматично виявляти взаємозв'язок між аудіо- та відеосигналами, враховуючи їхню часову затримку та варіабельність у динаміці.

Пропонується **нормалізувати** відеопотік перед застосуванням функції *correlate*, що відіграє ключову роль у підвищенні точності та ефективності аналізу кореляції між відео- та аудіосигналами. Це допоможе усунути вплив різниці у масштабах та освітленості, а також спрощує ідентифікацію взаємозв'язків між сигналами.

Пропоновані кроки алгоритму нормалізації відеопотоку є наступними.

**Перетворення у сірий колір.** Цей крок зменшує обчислювальну складність розроблюваного методу, оскільки кожен кадр міститиме тільки один канал інтенсивності замість трьох колірних каналів.

Лістинг 1. Приведення кадру відеосигналу до сірого кольору.

```
import cv2
gray_video = cv2.cvtColor(video_frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
```

**Масштабування інтенсивності.** Нормалізація інтенсивності кольору пікселів у відеосигналу до діапазону [0, 1] або [-1, 1] має на меті уніфікацію рівня освітленості та контрастності між різними кадрами. Цього можна досягти, наприклад, з використанням бібліотеки *ffmpeg* [9].

Лістинг 2. Нормалізація відеосигналу.

```
import cv2
ffmpeg-normalize input.mp4 -o output.mp4 -c:a aac -b:a 192k
```

**Виділення характеристичних ознак.** Для подальшого виявлення кореляції відео- з аудіосигналами доцільно використовувати методи комп'ютерного зору для виділення характеристичних ознак, які відображають рух голосових зв'язок. Пропонується використовувати функцію бібліотеки cv2 [10].

Лістинг 3. Виділення характеристик для визначення кореляції.

```
import cv2
import numpy as np
cap = cv2.VideoCapture('path/to/your/video.mp4')
while True:
    ret, frame = cap.read()
    if not ret:
        break # Якщо кадри закінчились, завершити цикл
    # Виявлення "хороших" точок
    corners = cv2.goodFeaturesToTrack(gray_frame, maxCorners=50,
        qualityLevel=0.01, minDistance=10)
```

**Крос-кореляція** між аудіо- та відеосигналом даними визначає ступінь взаємозв'язку між ними при різних затримках часу. Це дозволяє визначити оптимальну затримку між аудіо- та відеосигналом, максимізуючи їхню кореляцію. У випадку моделювання гортані, аудіосигнали відповідають за звуки, що генеруються голосовими зв'язками, тоді як відеосигнали демонструють фізичний рух цих зв'язок.

Для двох сигналів  $x(t)$  та  $y(t)$  дискретна крос-кореляція [11] визначається як:

$$R(\tau) = \sum_{t=0}^{N-1} x[t] \cdot y[t + \tau],$$

де  $R(\tau)$  – функція крос-кореляції при затримці;

$x(t)$  – аудіо сигнал;

$y(t + \tau)$  – відеосигнал зі зміщенням на  $\tau$ ;

$N$  – довжина сигналу;

$t$  – часовий індекс.

Досить часто тривалість аудіо- та відеосигналу не збігається. Це вимагає спеціального підходу для їх синхронізації. Для аналізу кореляції між сигналами різної довжини можна використати зсув (lag) аудіо- відносно відеосигналу. Це дозволяє "просканувати" взаємозв'язок між сигналами на різних інтервалах часу з метою виявлення найбільшої кореляції. З практичної точки зору доцільніше зсувати коротший сигнал, обчислюючи **кореляцію** для кожного зсуву.

Лістинг 4. Виявлення кореляції.

```
import numpy as np
from scipy.signal import correlate
import matplotlib.pyplot as plt
# Обчислюємо крос-кореляцію
correlation = correlate(video, audio, mode='full')
lags = np.arange(-len(x) + 1, len(x))
plt.figure(figsize=(10, 5))
plt.plot(lags, correlation)
```

Після виявлення кореляції між відео- та аудіосигналами, наступним кроком є збереження темпоральних даних, отриманих у процесі кореляційного аналізу.

Доцільно зберігати дати та часові мітки, значення затримок, індекси кадрів відеосигналу, де виявлено максимальну кореляцію, та відповідні аудіофрагменти.

Лістинг 5. Приклад запропонованої структури даних.

```
import json

data = {
    'max_correlation_values': [0.95, 0.89, ...],
    'video_frame_indices': [150, 300, ...],
    'audio_timestamps': ['00:01:05', '00:02:10', ...]
}
```

Це дає змогу використовувати ці дані для подальшого аналізу, відстеження, відновлення чи інших завдань. Наприклад, крім побудови цифрового двійника, можна використовувати машинне навчання для детального аналізу взаємозв'язку між рухом голосових зв'язок та характеристиками голосу. Також можна застосовувати елементи штучного інтелекту для виявлення специфічних ознак в аудіо- та відеоданих, які корелюють з певними фізіологічними станами.

Розглянемо результати експериментальної частини дослідження.

На рис. 1 показано знайдені точки для трекінгу. Зміщення таких точок відносно першого кадру можна використовувати як нормалізоване представлення відеопотоку. За нормалізоване значення аудіосигналу візьмемо його частоту. В експерименті використовувалися фрагменти довжиною в 1.2 та 1 секунду.

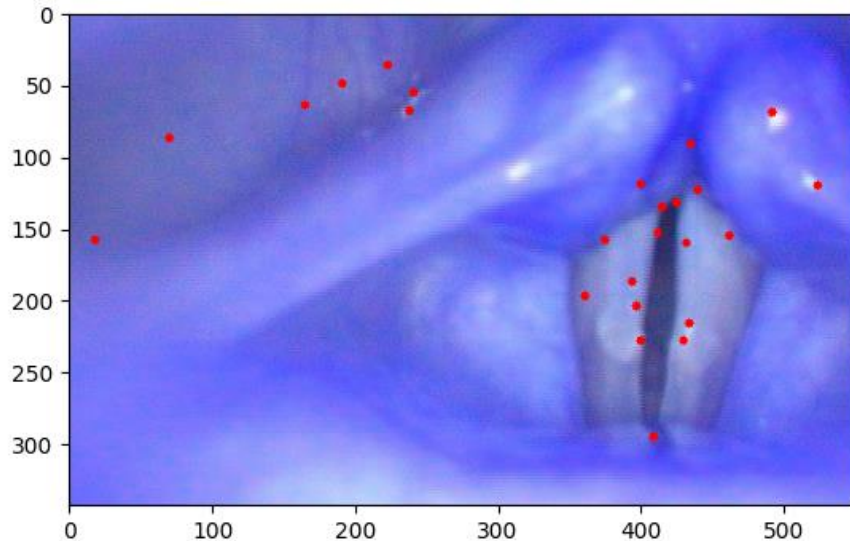


Рисунок 1 - Візуалізація знайдених точок для трекінгу

Показаний на рис. 2 графік демонструє візуалізацію крос-кореляції між нормованими відео- та аудіосигналами. Точка на графіку, яка позначена червоним кольором, є маркером зміщення, при якому кореляція між сигналами досягає свого максимуму. Це зміщення і є шуканим оптимальним значенням синхронізації між аудіо- та відеосигналом.



Рисунок 2 - Візуалізація обчисленої максимальної кореляції

Побудуємо графіки обох сигналів і накладемо їх один на одного з урахуванням зміщення для кращої візуалізації. Отриманий результат наведено на рис. 3.

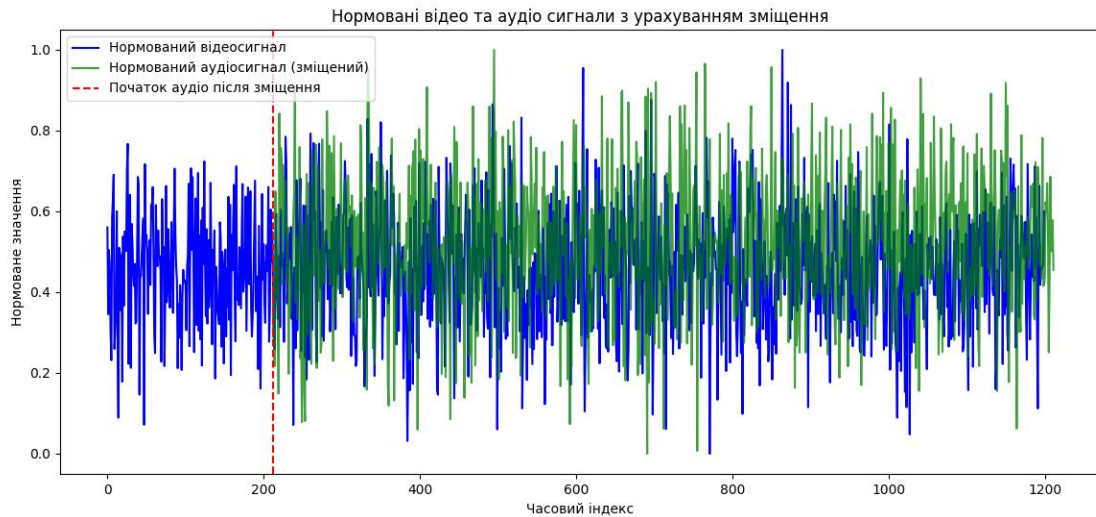


Рисунок 3 - Накладені нормалізовані значення

Отримана візуалізація ілюструє, як два сигнали відповідають один одному у часі, враховуючи визначене оптимальне зміщення.

Хоча розроблений метод синхронізації темпоральних мультимодальних даних демонструє високу ефективність, він не позбавлений недоліків. Один з основних недоліків полягає у потребі у доволі значних обчислювальних ресурсів, особливо при обробці великих даних. Крім того, алгоритм реалізації розробленого методу може бути чутливим до шуму в даних, що може впливати на точність синхронізації. Виходячи з вищезазначеного, шляхи подальшого вдосконалення можуть включати розроблення більш ефективних алгоритмів обробки, які оптимізують використання обчислювальних ресурсів. Також корисним буде впровадження додаткових методів фільтрації шуму та покращення чутливості до помилок у даних. Використання технік машинного навчання для автоматичного виправлення помилок та ідентифікації оптимальних параметрів синхронізації також може значно підвищити точність і надійність методу.

**Висновки.** У статті розглянуто передові підходи та методики для синхронізації темпоральних мультимодальних даних, зокрема в контексті моделювання гортані. Встановлення точної кореляції між відео- та аудіосигналами є вирішальним для точного аналізу динаміки голосоутворення, що може сприяти покращенню діагностики та лікування розладів голосу.

Запропоновано удосконалений метод синхронізації темпоральних мультимодальних даних, який інтегрує алгоритми крос-кореляції з техніками машинного навчання для точного виявлення зв'язку між відео- та аудіосигналами. Цей підхід дає змогу не тільки виявляти затримки між сигналами з високою точністю, але й ефективно обробляти мультимодальні дані з різноманітними характеристиками. Основною особливістю запропонованого методу є використання комп'ютерного зору для автоматичного та коректного виявлення ключових точок на зображенні та встановлення їхньої кореляції з аудіопараметрами, що відкриває нові можливості для аналізу динаміки голосоутворення та дослідження інших медико-біологічних об'єктів. Пропонований метод забезпечує високу стійкість до зовнішніх перешкод та шумів, а також надає можливість адаптації до довільної роздільності вхідного відеопотоку. Це є

важливим для точної обробки темпоральних даних, необхідних для подальшого моделювання цифрового двійника або інших маніпуляцій.

Автори висловлюють подяку Шидловській Т.А., доктору медичних наук, професору, завідувачці лабораторії голосу і слуху Державної установи «Інститут отоларингології ім. проф. О.С. Коломійченка АМН України», за надання медичних зображень та консультаційну допомогу. Медичні зображення надані з дотриманням вимог медичної етики і конфіденційності інформації.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Yanase, J. and Triantaphyllou, E., 2019. A systematic survey of computer-aided diagnosis in medicine: Past and present developments. *Expert Systems with Applications*, 138, p.112821.
2. Lynn, L.A., 2019. Artificial intelligence systems for complex decision-making in acute care medicine: a review. *Patient safety in Surgery*, 13(1), p.6.
3. Bailly, L., Cochereau, T., Orgéas, L., Henrich Bernardoni, N., Rolland du Roscoat, S., McLeer-Florin, A., Robert, Y., Laval, X., Laurencin, T., Chaffanjon, P. and Fayard, B., 2018. 3D multiscale imaging of human vocal folds using synchrotron X-ray microtomography in phase retrieval mode. *Scientific reports*, 8(1), p.14003.
4. Woo, P., 2021. *Stroboscopy and high-speed imaging of the vocal function*. Plural publishing.
5. Soltanisehat, L., Alizadeh, R., Hao, H. and Choo, K.K.R., 2020. Technical, temporal, and spatial research challenges and opportunities in blockchain-based healthcare: A systematic literature review. *IEEE Transactions on Engineering Management*, 70(1), pp.353-368.
6. Steneker, M., 2016. Towards an empirical validation of the TIOBE Quality Indicator (Doctoral dissertation, Eindhoven University of Technology).
7. White, A.C. and Carding, P., 2022. Pre-and postoperative voice therapy for benign vocal fold lesions: factors influencing a complex intervention. *Journal of Voice*, 36(1), pp.59-67.
8. Rast, C., Unteregger, F., Honegger, F., Zwicky, S. and Storck, C., 2023. An Old Myth: Prediction of the Correct Singing Voice Classification. True or not?. *Journal of Voice*, 37(6), pp.968-e13.
9. Wu, X., Qu, P., Wang, S., Xie, L. and Dong, J., 2021. Extend the FFmpeg framework to analyze media content. arXiv preprint arXiv:2103.03539.
10. Demidenko, O.M., Aksionova, N.A., Varuyeu, A.V. and Kucharav, A.I., 2021, November. 3D-modeling of Augmented Reality objects using Shi-Tomasi corner detection algorithms. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 2091, No. 1, p. 012058). IOP Publishing.
11. Sun, Z., Sarma, P., Sethares, W. and Liang, Y., 2020, April. Learning relationships between text, audio, and video via deep canonical correlation for multimodal language analysis. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 34, No. 05, pp. 8992-8999).

Received 24.06.2024.  
Accepted 27.06.2024.

#### ***Methods of creating digital twins of medico-biological objects using otolaryngology as an example***

*The paper presents an in-depth analysis on the most suitable tools and techniques for the formulation of a digital twin, specifically focusing on internal organs. The larynx, a pivotal organ in the human respiratory and vocal systems, is highlighted as the primary case study. The basis of this digital twin generation is the video stream sourced directly from a medical device's onboard camera, which provides real-time visual data of the organ. Two methodologies are put under the*

*microscope in this study: one that harnesses the power of neural networks and another grounded in algorithmic reconstruction using crucial points or markers within the video feed. Each method is evaluated against a set of well-defined criteria. These benchmarks include the efficiency of the tool, the accuracy of the digital representation it produces, the speed of its response, and its overall applicability within the confines of a typical medical environment.*

*After a rigorous comparative analysis, the research gravitates towards neural network-based approaches, spotlighting them due to several standout features. Neural networks, as elucidated in the paper, exhibit remarkable adaptability, ensuring that they can be tailored to diverse medical scenarios. Their accuracy, even when confronted with "noisy" or fragmented data, is another standout feature. This is paramount, especially in real-world scenarios where the data might not always be pristine. The ability of neural networks to sieve through such data and still produce accurate digital representations is a significant advancement in the field.*

*In conclusion, by affirming the superior potential of neural networks in crafting precise digital avatars of internal organs, the research not only provides a blueprint for enhanced diagnostic and therapeutic methodologies but also underscores a paradigm shift in how medical professionals can leverage technology for better patient outcomes. This synthesis of medical expertise and cutting-edge technology is poised to redefine the boundaries of medical science, heralding a new era of advanced diagnostics and treatment modalities.*

**Песчанський Владислав Юрійович** – аспірант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, [vladpeschansky@gmail.com](mailto:vladpeschansky@gmail.com).

**Сулема Євгенія Станіславівна** – доктор технічних наук, завідувачка кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ.

**Vladyslav Peschanskii** – Post-Graduate Student of Computer Systems Software Department National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, [vladpeschansky@gmail.com](mailto:vladpeschansky@gmail.com).

**Yevgeniya Sulema** – DSc, Head of Computer Systems Software Department. National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv.

## СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ АНОМАЛІЙ В РОБОТІ ENTERPRISE SYSTEMS

*Анотація. У сучасних корпоративних системах зростаюча складність і масштаби програмного забезпечення створюють нові виклики для підтримки їх надійної та стабільної роботи. Одним з критичних аспектів є ідентифікація аномалій, які можуть призвести до збоїв у роботі систем, втрати даних або зниження продуктивності. Виявлення таких аномалій на ранніх етапах є важливою задачею для забезпечення безперебійного функціонування підприємства.*

*Метою цієї публікації є наочно описати наявні виклики, складність програмних систем, непередбачуваність виникнення збоїв, унікальність кожної окремої системи та неможливість запису усієї необхідної інформації для знаходження першопрічини.*

*Одним з ефективних методів діагностики аномалій є аналіз знімків пам'яті (memory dumps). Цей підхід дозволяє отримати детальний стан системи на момент виникнення помилки або аномальної поведінки, що значно спрощує процес виявлення першопрічин. Проте, сучасні системи працюють у складних умовах з величезними обсягами даних, тому класичні підходи до аналізу часто виявляються недостатньо ефективними.*

*У даній статті розглядаються сучасні проблеми ідентифікації аномалій у роботі корпоративних систем за допомогою аналізу знімків пам'яті, аналізуються методи та інструменти, що використовуються для цього завдання, та обговорюються можливі напрями їх подальшого розвитку.*

*Ключові слова: ідентифікація аномалій, корпоративні системи, знімки пам'яті, оптимізація продуктивності, виявлення проблем, машинне навчання, профілювання коду, алгоритми оптимізації, моніторинг систем, розподілені системи.*

**Вступ.** З кожним роком корпоративні системи стають все більш складними та масштабними, що збільшує кількість потенційних проблем, які можуть вплинути на їхню продуктивність і стабільність [1, 2, 3]. Аномалії в роботі таких систем, як збої в роботі програмного забезпечення або неочікувані відхилення від нормальної поведінки, можуть призводити до значних втрат продуктивності або навіть до повної зупинки роботи компанії. Виявлення та усунення цих аномалій є ключовим аспектом для забезпечення безперервного функціонування корпоративних систем.

Метою статті є дослідження сучасних алгоритмів та інструментів для виявлення аномалій у роботі корпоративних систем за допомогою аналізу знімків пам'яті, а також оцінка їх ефективності, викликів та обмежень. Стаття також спрямована на вивчення існуючих ме-

тодів оптимізації продуктивності програмного забезпечення і визначення можливих напрямків подальших досліджень для покращення процесів ідентифікації та усунення проблем у корпоративних системах.

**Алгоритми та інструменти для виявлення проблем.** В основі статистичних методів лежить ідея математичної репрезентації даних, як-то середніх значень, дисперсій та інших статистичних показників [4]. Це дозволяє виявляти аномалії на рівні агрегованих даних, зазвичай в метриках системного моніторингу.

Важливо зазначити, що метод може лише використовуватись постфактум для виявлення факту аномалії, але не може надати першопричину яка призвела до проблемної поведінки.

Алгоритми машинного навчання можуть бути використані для автоматичного виявлення аномалій в системі. Вони дозволяють моделювати нормальне поведінку системи і виявляти відхилення від неї. Для виявлення аномалій використовується історична база метрик моніторингу [5]. Дозволяє ідентифікувати факт настання неординарної ситуації, але не надає першопричини.

Для детальної діагностики використовують знімки пам'яті та інші види профілювання [6]. Це може допомогти в ідентифікації вузьких місць на рівні коду, включаючи витрати пам'яті або неоптимальне використання ресурсів.

Лімітацією цього підходу є необхідність збору даних саме у час настання неочікуваної ситуації.

Біхевіоральні алгоритми спрямовані на аналіз "поведінки" системи або її компонентів. Це може включати в себе аналіз послідовностей операцій, швидкість обробки запитів, інтеракцій між компонентами та інше.

Загалом, ефективність виявлення проблем залежить від комбінації алгоритмічних методів, інструментарію, та їх правильної інтеграції в архітектуру системи.

**Методи оптимізації та їх застосування.** Методи оптимізації в програмній інженерії охоплюють широкий спектр технік, що мають на меті покращення ефективності, швидкодії, та стабільності систем [7]. Застосування цих методів може суттєво відрізнитися в залежності від домену, мови програмування, та архітектурних рішень.

Процедурна оптимізація стосується низькорівневих алгоритмічних підходів, які включають оптимізацію циклів, уникнення дублювання виразів, та використання оптимізованих структур даних. Тут може бути застосовано, наприклад, бітові маніпуляції для прискорення операцій.

Методи векторизації та паралелізації зосереджені на оптимізації для конкретного обладнання, використовуючи багатопоточність або специфічні інструкції процесора. Це дозволяє значно підвищити швидкодію, але може обмежувати крос-платформеність [8].

Однією з широко застосовуваних технік є кешування результатів функцій та запитів до бази даних, що значно знижує навантаження та прискорює відгук системи. Меморизація дозволяє зберігати результати важких функцій для подальшого повторного використання.

Профільювання коду дає можливість ідентифікувати "вузькі місця" в системі, де оптимізація принесе найбільший ефект. Моніторинг дозволяє відстежувати стан системи в реальному часі, ідентифікувати та реагувати на можливі проблеми.

В області роботи з базами даних основні методи оптимізації включають в себе правильний вибір індексів, оптимізацію запитів SQL, та денормалізацію даних.

**Виклики та обмеження.** В основі виявлення проблем в системах програмного забезпечення лежить агрегована діагностична інформація, яка може бути отримана з двох основних джерел: системних журналів та доступних метрик. Специфічні виклики виникають у контексті навантаження на систему та валідності отриманих даних.

Співвідношення між діагностичною ефективністю та навантаженням на систему, а також між глибиною аналізу та обсягом зібраної інформації, формує комплексні виклики в розробці алгоритмів та інструментів для виявлення проблем в програмних системах. Активний запис діагностичних даних може суттєво вплинути на загальну продуктивність системи [9]. Це може відбуватися через ІО-навантаження або навіть викликати вибіркочку втрату інформації через наявні механізми семплювання. Загальнодоступні метрики, хоча і можуть служити індикаторами проблем (наприклад, зростання використання пам'яті або CPU), рідко забезпечують достатній контекст для ідентифікації первинних причин.

Зазвичай, аналітичні методи включають в себе візуалізацію агрегованих даних, формулювання гіпотез на їх основі [6], та інкрементальний збір додаткової діагностичної інформації для перевірки цих гіпотез. Ідеальним сценарієм є можливість репродукування проблемного сценарію в ізолюваному тестовому середовищі на основі зібраних даних. Але для побудови відповідної моделі необхідно використовувати реальні дані.

Прикладом є використання хеш-алгоритму який видає рівний розподіл даних на площині потенційних значень і згідно математичної моделі та тестових даних є ідеальним кандидатом. Але на практиці, система працює лише з вузьким діапазоном даних і «теоритично-обґрунтований» алгоритм хешування видає результати на порядок гірший за алгоритм який видає рівний розподіл тільки для використовуваного діапазону.

Однією з інноваційних технік є використання знімків пам'яті від реальних процесів для аналізу та виявлення аномалій. Ці знімки можуть надати глибокий інсайт про стан системи у моменти критичних збоїв або падіння продуктивності. Враховуючи велику кількість обчислювальних операцій яку виконує система, зняття знімку із затримкою у декілька секунд буде містити інформацію яка на декілька мільярдів розрахунків знаходиться далі у часі і може не охоплювати дані які призвели до аномалії.

**Труднощі при аналізі та оптимізації програмного забезпечення.** Сучасні високонавантажені програмні системи є вкрай складними, що ускладнює аналіз та вибір оптимальних рішень. Множина залежностей між компонентами може призвести до неочікуваних побічних ефектів під час оптимізації. Необхідність отримання доступності системи близької до ста відсотків та незалежного масштабування частин під навантаженням накладає необхідність

рознесення частин по фізично-різним обчислювальним машинам, що означає недостатність розгляду одного програмного процесу для розуміння загальної поведінки системи.

Наявність теоретичного оптимального алгоритму не є гарантом прийнятної сукупної швидкодії. Наприклад, система без вільних потоків для запуску частини розрахунків у алгоритмах з паралелізацією призведе до стагнації програмного додатку.

При аналізі цього інциденту не буде жодних діагностичних відміток щодо реальної причини бо його першопричина є механізм розподілу потоків для виконання – частин керуючого середовища яка знаходиться поза полем зору інженерів програмного коду.

Навіть відкинувши непередбачувану природу явища, що унеможливорює запуск короткої сесії профілювання, а також високе навантаження системи що не гарантує можливість запуску нового процесу, в отриманій сесії розподіл використаного процесорного часу буде цілком позначено на алгоритмі.

**Огляд обмежень поточних методів та інструментів.** Вищеописані приклади наочно демонструють обмеження поточних методів:

- непередбачувана у часі природа явища унеможливорює завчасний запуск профілювання,
- високонавантажені системи у пікові навантаження мають дефіцит процесорного часу, успіх запуску профілювання (нового процесу) не гарантовано,
- непередбачуваність за джерелом унеможливорює запис у діагностичний лог саме тих даних які дозволять зрозуміти та чітко змодельовати проблему у тестовому середовищі,
- вплив середовища виконання (як менеджмент потоків) теж залишається поза увагою моделювання,
- жодна з існуючих технологій не дає 100% часу онлайн, то доступність розподіленої системи деградує від кількості взаємозалежних вузлів,
- розподілені системи використовують мережу, яка також не надає стовідсоткову доступність.

Таким чином, необхідно розробити методологію дослідження високонавантажених програмних додатків яка:

- відповідь на існуючі виклики діагностування,
- дозволить моделювання процесів з використанням реальної інформації (як даних, так і операцій),
- буде враховувати систему виконання,
- буде брати до уваги не ідеальність оточуючих частин системи,
- не буде призводити до падіння швидкодії через присутність ефекту наглядача,
- зведе до мінімуму необхідність розміщення оновлення програмного забезпечення з покращеним записом діагностичної інформації.

Використання знімків пам'яті, на думку автора, відповідає існуючим викликам.

**Огляд поточних трендів в аналізі пам'яті та оптимізації.** Через необхідність глибокої технічної експертизи у розумінні повного циклу виконання програмного забезпечення:

- апаратна частина (виконання процесорних команд, наявність особистої/спільної кеш-пам'яті у процесорних ядрах),
- принципів роботи операційної системи (виконання користувача / ядра, наявність гіпервізора, система введення-виведення),
- принципів роботи середовища виконання (трансляції коду, робота з потоками, обробка помилок),
- робота програмного додатку.

Існує критично мало технічно-змістовних публікацій за тематикою. Існуючі програмні рішення здебільшого фокусуються на збиранні та візуалізації діагностичної інформації з логів та метрик, наприклад Azure Application Insights, NewRelic, Datalog. Ці рішення беруть на себе завдання зі збору та агрегації діагностичної інформації. Але саме аналіз та подальші оптимізації є обов'язком інженерів.

Через надвелику площину можливих причин виникнення проблемних ситуацій і їх притаманності саме конкретним системам, використання штучного інтелекту не показує гарних результатів. Ураховуючи значні економічні втрати від проблем зі стабільністю та продуктивністю, передові компанії намагаються вирішити цю проблему через громаду та публічні проекти, такі як ClrMD та PerfView. Вони дозволяють розробникам автоматизувати аналіз знімків пам'яті та профайлів.

**Розроблена методологія дослідження неоптимальностей роботи програмного забезпечення.** Запропонована методологія дослідження неоптимальностей роботи програмного забезпечення складається з таких кроків:

1. Постановка проблеми, визначення історичної поведінки як неоптимальної, встановлення часового проміжку
2. Застосування USE [6] методології для встановленого часового проміжку:
  - Usage – аналіз «використання» для кожної метрики (CPU / RAM / Sockets / Threads / Requests),
  - Saturation – чи є «насищення» ресурсів при якому з'являться черги на виконання,
  - Errors – помилки, які помилки система записала в журнал.
3. На основі аналізу метрик та визначення проблеми, встановлення автоматичного збору знімків пам'яті.
4. Аналіз знімків пам'яті які містять цілісний процес для виявлення першопричини.
5. Розробка рішення та оцінка його швидкодії відносно базової реалізації з використанням реальних даних і розподілу операцій.

Подальше дослідження спрямовано на знаходження паттернів у знімках пам'яті які є індикаторами неоптимальності виконання програмних додатків.

**Висновки.** Існуючі системи аналізу неоптимальностей виконання програмних додатків не відповідають викликам сучасних розподілених систем. Відсутність можливостей збору

необхідної інформації саме у момент настання збою призводить до створення гіпотез. У подальшому, ці гіпотези можуть бути підтверджені на основі моделей даних які будуть відрізнятись від реальних і не призведуть до вирішення першопричини. Запропонований новий комплексний підхід який дозволяє збирати увесь обсяг даних яким оперує процес, що робить можливим точно ідентифікувати першопричину, розробити покращену модель для її вирішення, та оцінити ефект на повністю відповідних даних.

Сучасні практики проектування програмних додатків будуються на модульності, програмуванні за контрактами, що унеможливує якісний статичний аналіз коду.

Проблеми стабільності та швидкодії програмного забезпечення постають все частіше при зростанні обсягів інформації, функціоналу, та одночасних користувачів і призводять до прямих матеріальних збитків, зростання загальної вартості володіння (Total cost of ownership).

### ЛІТЕРАТУРА

1. Мітіков М.Ю., Гук Н.А. Огляд методів виявлення та аналізу проблем продуктивності в програмному забезпеченні: підходи, виклики та перспективи // Питання прикладної математики і математичного моделювання [Текст]: зб. наук. пр. / редкол.: О.М. Кісельова (відп. ред.) [та ін.]. – Дніпро, 2023. – Вип. 23. – с. 171 – 178. doi: 10.15421/322318
2. Мітіков М.Ю., Гук Н.А. Огляд методів та інструментів системного аналізу продуктивності програмного забезпечення // Математичне та програмне забезпечення інтелектуальних систем (МПЗІС-2023): Тези доповідей XXI Міжнародної науково-практичної конференції, Дніпро, 22-24 листопада 2023 р. / Під загальною редакцією О.М. Кісельової. – Дніпро: ДНУ, 2023. – 213 – 214 с.
3. Мітіков М.Ю., Гук Н.А. Інформаційна технологія діагностики надмірного використання пам'яті на основі аналізу знімків пам'яті // Сучасні інформаційні та комунікаційні технології на транспорті, в промисловості і освіті: Тези XVII Міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 13-14 грудня 2023 р.). – Д.: УДУНТ, 2023. – с. 32.
4. Louridas P. Static code analysis / P. Louridas. // IEEE Software. – 2006. – Vol. 23, no. 4. – С. 58–61, doi: 10.1109/MS.2006.114.
5. Machine Learning for Anomaly Detection: A Systematic Review / A.B.Nassif, M.A. Talib, Q. Nasir, F.M. Dakalbab. // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – С. 78658–78700. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083060.
6. Smart detection in Application Insights [Електронний ресурс] / AbbyMSFT, KennedyDenMSFT, AaronMaxwell, v-jbasden // Microsoft. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/azure-monitor/alerts/proactive-diagnostics>.
7. Weninger M. Analyzing Data Structure Growth Over Time to Facilitate Memory Leak Detection / M. Weninger, E. Gander, H. Mössenböck. // In Proceedings of the 2019 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering (ICPE '19). – 2019. – С. 273–284. doi: 10.1145/3297663.3310297.
8. Veasey T. Anomaly Detection in Application Performance Monitoring Data / T. Veasey, S. Dodson. // International Journal of Machine Learning. – 2014. – Vol. 4, no. 2. – С. 120–126. doi: 10.7763/IJMLC.2014.V4.398.

9. Deep Learning for Anomaly Detection in Time-Series Data: Review, Analysis, and Guidelines / K.Choi, J. Yi, C. Park, S. Yoon. // IEEE. – 2021. – Vol. 9. – C. 120043–120065. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3107975.

## REFERENCES

1. Mitikov M., Huk N. Review of methods for identifying and analysing performance problems in software: approaches, challenges and prospects // Issues of Applied Mathematics and Mathematical Modelling [Text]: a collection of scientific papers / edited by O.M. Kiseleva (ed.) [and others.] - Dnipro, 2023. - Issue 23. - pp. 171 - 178. doi: 10.15421/322318
2. Mitikov M., Guk N. Review of methods and tools for system analysis of software performance // Mathematical and software of intelligent systems (MPIS-2023): Abstracts of the XXI International Scientific and Practical Conference, Dnipro, 22-24 November 2023 / Edited by O.M. Kiselova - Dnipro: DNU, 2023. 213 - 214 p.
3. Mitikov M., Guk N. Information technology for diagnosing excessive memory usage based on the analysis of memory snapshots // Modern information and communication technologies in transport, industry and education: Theses of the XVII International Scientific and Practical Conference (Dnipro, 13-14 December 2023): USUNT, 2023. - p. 32.
4. Louridas P. Static code analysis / P. Louridas. // IEEE Software. – 2006. – Vol. 23, no. 4. – C. 58–61, doi: 10.1109/MS.2006.114.
5. Machine Learning for Anomaly Detection: A Systematic Review / A.B.Nassif, M.A. Talib, Q. Nasir, F.M. Dakalbab. // IEEE Access. – 2021. – Vol. 9. – C. 78658–78700. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083060.
6. Smart detection in Application Insights [Електронний ресурс] / AbbyMSFT, KennedyDenMSFT, AaronMaxwell, v-jbasden // Microsoft. – 2024. – Режим доступу до ресурсу: <https://learn.microsoft.com/en-us/azure/azure-monitor/alerts/proactive-diagnostics>.
7. Weninger M. Analyzing Data Structure Growth Over Time to Facilitate Memory Leak Detection / M. Weninger, E. Gander, H. Mössenböck. // In Proceedings of the 2019 ACM/SPEC International Conference on Performance Engineering (ICPE '19). – 2019. – C. 273–284. doi: [10.1145/3297663.3310297](https://doi.org/10.1145/3297663.3310297).
8. Veasey T. Anomaly Detection in Application Performance Monitoring Data / T. Veasey, S. Dodson. // International Journal of Machine Learning. – 2014. – Vol. 4, no. 2. – C. 120–126. doi: [10.7763/IJMLC.2014.V4.398](https://doi.org/10.7763/IJMLC.2014.V4.398).
9. Deep Learning for Anomaly Detection in Time-Series Data: Review, Analysis, and Guidelines / K.Choi, J. Yi, C. Park, S. Yoon. // IEEE. – 2021. – Vol. 9. – C. 120043–120065. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3107975.

Received 24.06.2024.  
Accepted 27.06.2024.

### ***Modern problems of anomaly identification in Enterprise Systems***

*The article addresses modern challenges in anomaly detection within enterprise systems using memory dump analysis. As the complexity of enterprise systems grows, the number of potential issues affecting their stability and performance also increases. Anomalies, such as software failures or unexpected deviations from normal behavior, can lead to serious consequences, including data*

loss, reduced performance, or even complete system shutdown. Detecting and resolving these anomalies is a critical task for maintaining uninterrupted operation in enterprise environments.

The primary method discussed in this article is memory dump analysis, which provides detailed information about the system's state at the time of an anomaly. This method is effective for identifying root causes of failures, such as memory leaks or other resource-intensive operations. However, due to the large volumes of data and the complexity of modern software systems, memory dump analysis faces several challenges, such as the need for precise data collection during incidents and the requirement for powerful computational resources to process such data.

The article thoroughly analyzes algorithms and tools used for detecting problems in enterprise systems. Specifically, statistical methods, machine learning algorithms, and tools for memory dump analysis are reviewed. Machine learning techniques enable the creation of models representing normal system behavior and automatically detect deviations from these models, facilitating timely identification of potential issues. Additionally, optimization methods aimed at improving system performance, including techniques such as parallelization, caching, and code profiling, are explored.

One of the main challenges discussed in the article is the limitations of existing methods and tools for software analysis. High-load systems often face difficulties in real-time profiling and monitoring, complicating the identification of root causes. The article also examines limitations related to the accuracy of data collection and the complexity of diagnosing issues in distributed systems.

Based on the analysis, the article suggests future prospects for improving modern methods of anomaly detection in enterprise systems. Key areas for further research include enhancing machine learning algorithms for memory dump analysis, developing more efficient optimization methods, and improving monitoring tools to increase the accuracy and speed of problem detection. The article also highlights the importance of integrating these technologies into real-world enterprise environments to ensure stability and reliability.

*Keywords:* anomaly detection, enterprise systems, memory dumps, performance optimization, problem detection, machine learning, code profiling, optimization algorithms, system monitoring, distributed systems.

**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](mailto: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](mailto: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](mailto: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](mailto:mitikov.m22@fpm.dnu.edu.ua), ORCID ID: 0009-0002-1297-5676.

## ПІДХІД ДО МІГРАЦІЙ У ЗАДАЧІ РОЗМІЩЕННЯ КОНТЕЙНЕРІВ

*Анотація. У сучасному світі інформаційних технологій, хмарні обчислення, та контейнера віртуалізація набувають все більшої популярності. Широкого попиту набуває послуга розміщення контейнерів. Перед хмарними провайдерами постає завдання не тільки ефективного початкового розміщення контейнерів, а й їхньої динамічної зміни розташування у відповідь на змінні вимоги, що вимагає розробки та застосування міграційних алгоритмів. У статті проаналізовано важливість використання міграції контейнерів у контексті задачі розміщення контейнерів у хмарних центрах обробки даних. Метою дослідження є підвищення продуктивності хмарного ЦОД у задачі розміщення контейнерів, шляхом використання алгоритмів міграції. Використання міграції дозволяє уникнути перевантаження або недовантаження серверів та віртуальних машин. В рамках дослідження було розроблено гібридний алгоритм міграції, що включає в себе як міграцію контейнерів, так і віртуальних машин. Описано математичні аспекти задачі розміщення контейнерів та описано алгоритм міграцій. Експерименти показали, що впровадження цього алгоритму дозволяє знизити операційні витрати на 24% порівняно з традиційними методами, які не використовують міграцію, і на 9% порівняно з менш гнучкими міграційними стратегіями. Також продемонстровано зниження часу порушень SLA на 40%, що свідчить про покращення якості обслуговування. Висновки цього дослідження підтверджують, що міграція контейнерів та віртуальних машин є необхідною для ефективного управління динамічними ресурсами у хмарних ЦОД у контексті задачі розміщення контейнерів.*

*Ключові слова: контейнерна віртуалізація, міграція, хмарний провайдер, ЦОД, віртуальна машина, оптимізація, метод управління, алгоритми.*

### Постановка проблеми

У сучасному світі інформаційних технологій хмарні обчислення набирають все більшої популярності, оскільки вони пропонують значні переваги у гнучкості, масштабованості та ефективності. Це технологія дозволяє організаціям зменшити витрати на обладнання, енергію та обслуговування, адже фізичні дані та ресурси зберігаються у віртуальних хмарах, якими можна керувати віддалено. Зі зростанням об'ємів даних і складності обчислювальних завдань, хмарні рішення пропонують значну гнучкість у розподілі ресурсів, дозволяючи користувачам оптимізувати процеси без необхідності інвестицій у дороге обладнання.

Паралельно з ростом популярності хмарних обчислень, технології контейнерної віртуалізації також зазнають значного поширення. Контейнери надають чимало переваг порівняно з традиційними віртуальними машинами, зокрема завдяки їх легкій вазі та швидкодії [1, 2].

Перед хмарними провайдерами постає задача розміщення контейнерів – надати клієнтам можливість за запитом розмістити заданий контейнер. Контейнери, в свою чергу, розміщуються на віртуальних машинах [3].

Тому, хмарний провайдер має необхідність у ефективному вирішенні задачі розміщення: віртуальних машин (VM) на фізичних серверах (ФС), та контейнерів на VM задля зменшення витрат, а саме зменшення витрат на електроенергію та порушення угод про надання послуг (SLA) [4,5].

Задача розміщення розглядається як задача багатовимірного пукування, де необхідно розмістити ресурси так, щоб була використана найбільша наявна кількість ресурсів.

Така задача широко описана науковою спільнотою і вже наявно багато рішень ефективного початкового розміщення контейнерів. Проте, робота хмарного ЦОД не обмежується лише початковим розміщенням контейнерів, адже, у реальному світі надходять запити як на розміщення, так і на видалення контейнерів. В результаті чого, деякі VM або ФС можуть бути перевантажені, або недовантажені, що спричинить неефективне використання ресурсів. У таких випадках необхідно використовувати механізм міграції.

У даній статі розглядаються аспекти міграції контейнерів і VM у задачі розміщення контейнерів. Запропоновано алгоритм, який покращує використання ресурсів.

#### **Аналіз останніх досліджень і публікацій**

У роботі [6] автори описують гібридний підхід до консолідації віртуальних машини, який спрямований на мінімізацію споживання енергії та порушення SLA шляхом застосування модифікованої евристики зменшення найкращої відповідності до початкового розміщення віртуальної машини (VM) і застосування алгоритму beam search для керування міграціями VM. У даній роботі описано і доведено необхідність застосування міграцій при вирішенні задачі розміщення віртуальних машин, проте, проблема розміщення і міграції контейнерів не розглядається.

Автори [7-10] розглядають задачу міграції віртуальних машин у хмарному середовищі. Автори використовують як статичні, так і динамічні методи міграції. Представлено гібридні алгоритм оптимізації для обробки міграції VM. Запропоновані методи міграції націлені на зменшення споживання енергії, часу обчислень і вартості міграції, а також, на максимальне використання ресурсів. Доведено, що використання міграцій зменшує операційні витрати. Проте, в даних роботах задача розміщення та міграції контейнерів не розглядається. Задача розміщення контейнерів включає в себе задачу розміщення віртуальних машин, тому, використання вже існуючих методів є доцільним.

У роботі [11], автори аналізують та порівнюють існуючі алгоритми розміщення контейнерів, використовуючи інструмент Cloudsim [12]. Основна увага зосереджена на оцінці середнього споживання енергії, кількості активних віртуальних машин та фізичних машин. Виявлено, що алгоритм розміщення контейнерів за методом First Fit Decreasing (FFD) перевершує інші алгоритми за ефективністю використання ресурсів. Розглядається задача лише початкового розміщення контейнерів.

У статті [13], вивчається міграція в реальному часі для обох типів віртуалізації: VM та контейнерів. Результати показують, що використання міграції контейнерів, якщо це можливо, замість міграції VM, знижує споживання енергії, скорочує час міграції, що впливає на QoS та знижує порушення SLA. Проте, використовується лише статичний трешхолд на базі RAM, хоча ресурсна ємність описується, в тому числі і часом процесора, дисковим простором та кількістю операцій вводу-виводу в секунду.

Автори [14] запропонували метод міграції на основі контейнерів і порівняли продуктивність з існуючою схемою, на базі міграцій лише VM. Результати показують, що порівняно з існуючою схемою міграції, запропонована методика міграції контейнерів скорочує час простою та час міграції. Проте, міграція лише контейнерів, без міграції VM не дозволить ефективно управляти ресурсами, адже, можлива ситуація перевантаженості/недовантаженості фізичного сервера.

### Мета дослідження

Метою дослідження є підвищення продуктивності хмарного ЦОД у задачі розміщення контейнерів, шляхом використання алгоритмів міграції контейнерів. Завдяки використанні міграцій зменшити використання електроенергії у хмарному ЦОД, та зменшити час порушення SLA. Така мета зумовлена необхідністю хмарному провайдеру використовувати свої ресурси ефективно задля надання якіснішого сервісу, та утримання конкурентної ціни на свої послуги.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Задача розміщення контейнерів можна представити як задачу багатовимірної пакування, де ФС, VM та контейнер мають ресурсну ємність, описану рівняннями 1-3

$$PM_i = (PM_i^{CPU}, PM_i^{RAM}, PM_i^{DISK}, PM_i^{IOPS}), \#(1)$$

$$VM_i = (VM_i^{CPU}, VM_i^{RAM}, VM_i^{DISK}, VM_i^{IOPS}), \#(2)$$

$$C_i = (C_i^{CPU}, C_i^{RAM}, C_i^{DISK}, C_i^{IOPS}), \#(3)$$

На рисунку 1 схематично зображено розміщення VM на ФС та контейнерів на VM, так, що, кожен з компонентів має свою ресурсну ємність.

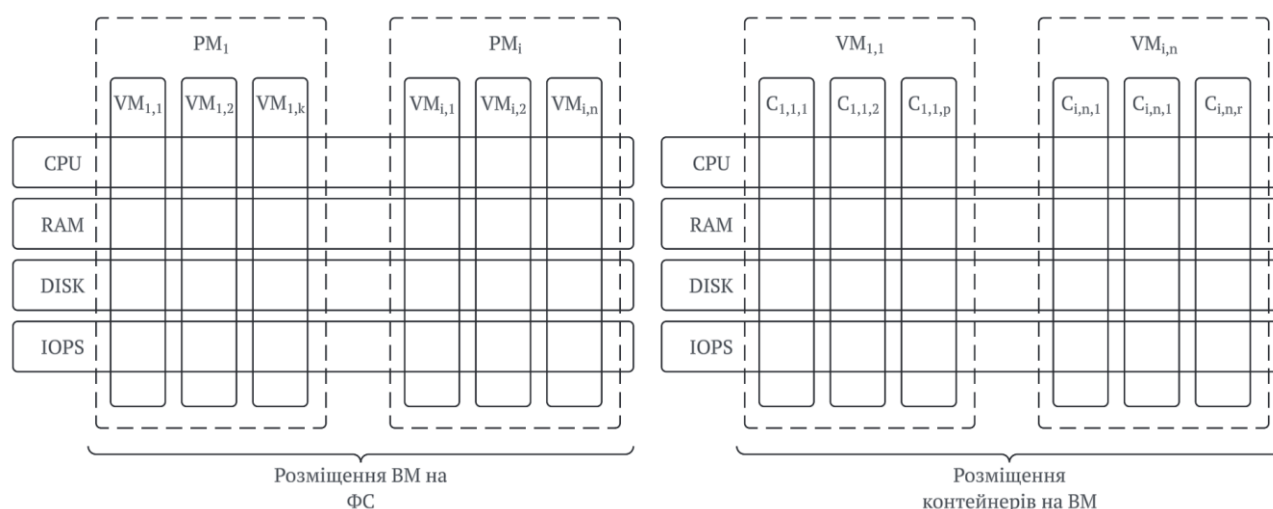


Рисунок 1 – Схематичне зображення розміщення VM на ФС та контейнерів на VM

Для кожного кроку управління ЦОД, існують матриці PMA (4), елементами якої є цілочисельні  $pma_{ij}(t) \in \{0,1\}$ , які вказують, чи j-та ВМ з множини  $VM$  розташована на i-му ФС, де  $PM = \{PM_i | i \in \{1, 2, \dots, n\}\}$  – множина фізичних серверів та  $VM = \{VM_i | i \in \{1, 2, \dots, m\}\}$  – множина віртуальних машин.

$$PMA(t) = \begin{pmatrix} pma_{1,1}(t) & \dots & pma_{1,n}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ pma_{m,1}(t) & \dots & pma_{n,m}(t) \end{pmatrix} \#(4)$$

Також, для віртуальних машин з контейнерами справедлива матриця (5), де  $vma_{ij}(t) \in \{0,1\}$ , які вказують, чи j-тий контейнер розташована на i-й ВМ

$$VMA(t) = \begin{pmatrix} vma_{1,1}(t) & \dots & vma_{1,n}(t) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ vma_{m,1}(t) & \dots & vma_{n,m}(t) \end{pmatrix} \#(5)$$

Віртуальна машина може знаходитися в одному зі станів: недовантажена, нормальний стан, перевантажена.  $VMO_i(t) \in [0,1]$  – якщо в момент часу t, i-та віртуальна машина недовантажена, то  $VMO_i(t) \in [0,0.2)$ , якщо перевантажена, то  $VMO_i(t) \in [0.8, 1]$ , інакше –  $VMO_i(t) \in [0.2, 0.8)$ .

Аналогічно справедливо і для фізичних серверів:  $PMO_i(t) \in [0,1]$ : якщо i-й фізичний сервер недовантажений, то  $PMO_i(t) \in [0,0.2)$ , якщо перевантажений, то  $PMO_i(t) \in [0.8, 1]$ , інакше –  $PMO_i(t) \in [0.2, 0.8)$ .

Нехай,  $r$  функція, яка визначає залишок ресурсу на хості. Тоді, 
$$VMO_i(t) = \frac{r(VM_i^{CPU})}{VM_i^{CPU}} + \frac{r(VM_i^{RAM})}{VM_i^{RAM}} + \frac{r(VM_i^{DISK})}{VM_i^{DISK}} + \frac{r(VM_i^{IOPS})}{VM_i^{IOPS}} \cdot 4$$
. Аналогічно і для  $PMO_i(t)$ .

Величини  $VMO$  та  $PMO$  приймають діапазон значень, що познає ступінь перевантаженості, чи недовантаженості задля можливості пошуку ФС та ВМ, з яких потрібно мігрувати.

Для кожного кроку управління ЦОД виконуються послідовні дії: розмістити контейнер та запустити процес міграції. Розміщення контейнера полягає в виборі ВМ, вільна ресурсна ємність якої більша за ресурсну ємність контейнера та розміщення контейнера на цій ВМ. За умови, що доступної ВМ не існує – створити нову та розмістити її на ФС. Якщо включеного ФС у ЦОД немає, то включити ФС, і розмістити на ньому ВМ. За умови, якщо ФС не знайдено – відмовити у наданні послуги.

Гібридний алгоритм міграції полягає у виконанні наступних кроків:

- Крок-1: Визначити  $VMO_i(t)$  для кожної  $VM_i$  із множини  $VM$ . Сортування за зростанням  $VMO_i(t)$ .

- Крок-2: Визначити всі  $VMO_i(t) < 0.2$ , як множину  $GU_{VM}$

- Крок-3: В кожній VM з  $GU_{VM}$ , для кожного контейнера в віртуальній машині – мігрувати контейнер на нову віртуальну машину так, щоб після міграції  $VMO_i(t) < 0.8$ , де  $i$  – номер віртуальної машини, на яку мігровано контейнер.
- Крок-4: видалити всі VM з  $GU_{VM}$
- Крок-5: Визначити всі  $VMO_i(t) \geq 0.8$ , як множину  $GO_{VM}$
- Крок-6: Визначити множину контейнерів  $GO_{VM}$ , змігрувавши які, залишковий  $VMO_i(t) < 0.8$ . Мігрувати  $GO_{VM}$  так, щоб після міграції  $VMO_i(t) < 0.8$ , де  $i$  – номер віртуальної машини, на яку мігровано контейнер.

Після того, як виконано всі міграції контейнерів, виконати аналогічні кроки (Крок-1 – Крок-6) по міграції віртуальних машин між фізичними серверами. Таким чином, після міграцій не буде залишатись перенавантажених, або недовантажених VM або ФС.

Таким чином, використовуючи гібридний алгоритм, зменшені операційні витрати на підтримку ЦОД, адже, в кінцевому виді, буде використано менше ресурсів, ніж якби міграцій не було.

Задля підтвердження ефективності запропонованого гібридного алгоритму, проведено серію із 10 експериментів, використовуючи розроблений інструментарій для симуляції розміщення контейнерів у хмарному ЦОД. Експерименти проведено у гетерогенній хмарі з двома типами фізичних серверів із ресурсною ємністю: CPU (3, 24) ядер, RAM (16384, 131072) мБ, DISK (256000, 1024000) б, IOPS (40000, 60000) та трьома типами віртуальних машин: CPU (1.5, 8, 24) ядер, RAM (8192, 43690, 65536) мБ, DISK (128000, 341333, 512000) б та IOPS (15000, 20000, 30000). Для початкового розміщення використовується алгоритм First Fit. Визначені ціни на ресурсну ємність (в умовних одиницях): CPU – 0.01 (за 1 секунду одного ядра), RAM - 0.0001, DISK - 0.00001, IOPS - 0.000001 (за 1 мБ); ціна порушення SLA – 0.01 за секунду.

На рисунку 2 зображено графіки залежності кумулятивної ціни експерименту та часу порушення SLA, в залежності від алгоритму.

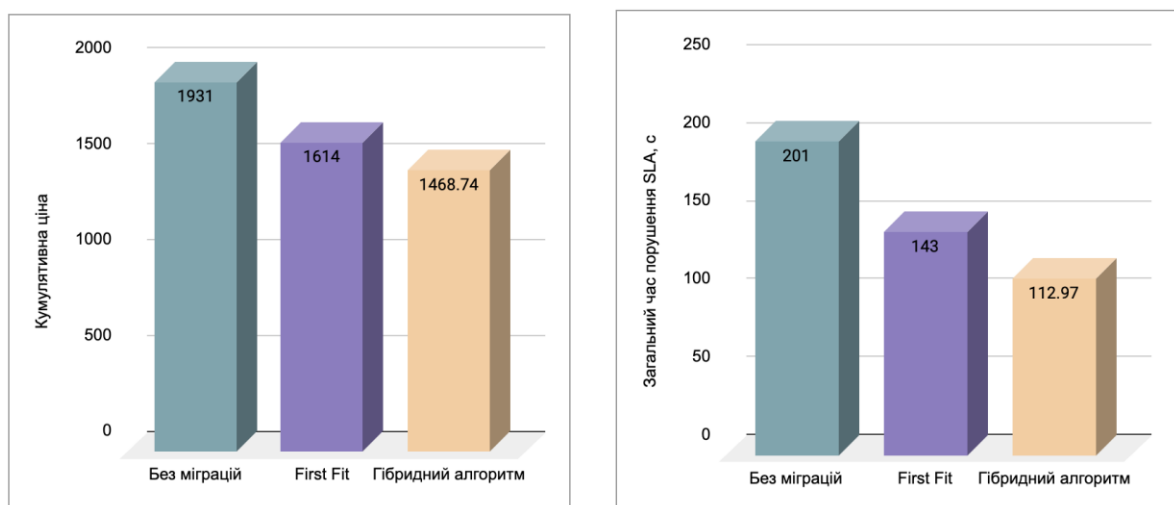


Рисунок 2 – Графіки залежності кумулятивної ціни експерименту та часу порушення SLA, в залежності від алгоритму

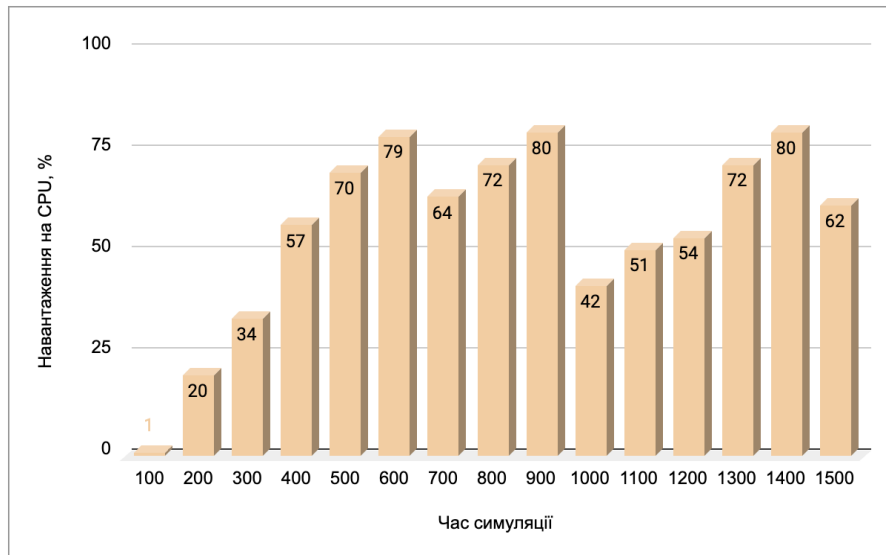


Рисунок 3 – Навантаження на CPU однієї з VM, в залежності від часу (гібридний алгоритм)

Видно, що запропонований гібридний алгоритм дозволяє зменшити кумулятивну ціну хмарного ЦОД на 24%, порівняно із алгоритмом, де міграції не використовуються, та на 9%, порівняно із міграціями за алгоритмом First Fit із статичним трешхолдом у 80% завантаженості з міграціями тільки контейнерів. Також, час порушення SLA зменшився на 40% та 21% відповідно.

На рисунку 3 зображено навантаження на CPU однієї з VM, в залежності від часу симуляції. З графіку видно, що коли навантаження наближалось до граничного, відбувались міграції, і поточне навантаження знижувалось. Завдяки цьому ресурси кластеру використовувались більш ефективно, що призвело до зниження кумулятивної ціни та часу порушення SLA.

### Висновки

У даній статті розглянуто важливість використання міграцій у процесах розміщення контейнерів у хмарних ЦОД. Дослідження підкреслює, що через динамічність обчислювальних потреб і зміни в робочих навантаженнях, систематичні міграції є необхідними для оптимального розподілу ресурсів і забезпечення високої доступності сервісів. Міграції допомагають уникнути перевантажень та недовантажень серверів, знижуючи таким чином ризики порушення угод про рівень обслуговування (SLA) та забезпечуючи більш ефективне використання енергії.

Було розроблено гібридний алгоритм міграцій з метою зниження витрат та підвищення продуктивності хмарних систем. Завдяки впровадженню цього алгоритму, вдалося значно знизити операційні витрати — на 24% порівняно з методами, які не використовують міграцію, і на 9% порівняно з підходом, коли в міграції беруть участь лише контейнери.

Крім того, гібридний алгоритм сприяв значному зниженню часу порушення SLA (на 40%), що демонструє його ефективність у забезпеченні більш стабільної та надійної роботи хмарних сервісів. Ці результати підкреслюють значущість міграції як критичної складової сучасних хмарних обчислень, забезпечуючи адаптацію до змінюваних вимог і оптимальне використання ресурсів.

Загалом, результати дослідження вказують на значний потенціал міграційних алгоритмів у підвищенні ефективності хмарних обчислень, дозволяючи ефективніше реагувати на змінні вимоги до ресурсів та оптимізувати використання доступних потужностей.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Katal A., Choudhury T., Dahiya S. Comparison and Analysis of Container Placement Algorithms in Cloud Data Center. *Emerging Trends in Expert Applications and Security*. Singapore, 2023. С. 239–252. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-1946-8\\_22](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1946-8_22).
2. Sturm R., Pollard C., Craig J. Managing Containerized Applications. *Application Performance Management (APM) in the Digital Enterprise*. 2017. С. 177–185. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804018-8.00013-9>.
3. Silva V. G. d., Kirikova M., Alksnis G. Containers for Virtualization: An Overview. *Applied Computer Systems*. 2018. Т. 23, № 1. С. 21–27. URL: <https://doi.org/10.2478/acss-2018-0003>.
4. Resource scheduling for infrastructure as a service (IaaS) in cloud computing: Challenges and opportunities / S. H. H. Madni та ін. *Journal of Network and Computer Applications*. 2016. Т. 68. С. 173–200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.04.016>.
5. Energy efficient scheduling of virtual machines in cloud with deadline constraint / Y. Ding та ін. *Future Generation Computer Systems*. 2015. Т. 50. С. 62–74. URL: <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.02.001>.
6. Cloud Resource Management with a Hybrid Virtual Machine Consolidation Approach / E. Zharikov та ін. 2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT), м. Kyiv, Ukraine, 18–20 груд. 2019 р. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/atit49449.2019.9030459>.
7. Khan M. S. A., Santhosh R. Hybrid Optimization Algorithm for VM Migration in Cloud Computing. *Computers and Electrical Engineering*. 2022. Т. 102. С. 108152. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108152>.
8. Migration-Based Load Balance of Virtual Machine Servers in Cloud Computing by Load Prediction Using Genetic-Based Methods / L.-H. Hung та ін. *IEEE Access*. 2021. Т. 9. С. 49760–49773. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3065170>.
9. Najm M., Tamarapalli V. Towards cost-aware VM migration to maximize the profit in federated clouds. *Future Generation Computer Systems*. 2022. Т. 134. С. 53–65. URL: <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.03.020>.
10. Rani J. K., Lakshmi M. S. Cloud Computing Challenges and Concerts in VM Migration. *International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics*. Cham, 2020. С. 135–142. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49795-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49795-8_12).
11. Katal A., Choudhury T., Dahiya S. Comparison and Analysis of Container Placement Algorithms in Cloud Data Center. *Emerging Trends in Expert Applications and Security*. Singapore, 2023. С. 239–252. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-1946-8\\_22](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1946-8_22).
12. CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms / R. N. Calheiros та ін. *Software: Practice and Experience*. 2010. Т. 41, № 1. С. 23–50. URL: <https://doi.org/10.1002/spe.995>.

13. Performance Evaluation of Virtual Machine and Container-Based Migration Technique / A. Bhardwaj та ін. *Proceedings of Data Analytics and Management*. Singapore, 2024. С. 551–558. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-6544-1\\_41](https://doi.org/10.1007/978-981-99-6544-1_41).
14. Smimite O., Afdel K. Containers Placement and Migration on Cloud System. *International Journal of Computer Applications*. 2020. T. 176, № 35. С. 9–18. URL: <https://doi.org/10.5120/ijca2020920493>.

#### REFERENCES

1. Katal A., Choudhury T., Dahiya S. Comparison and Analysis of Container Placement Algorithms in Cloud Data Center. *Emerging Trends in Expert Applications and Security*. Singapore, 2023. P. 239–252. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-1946-8\\_22](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1946-8_22).
2. Sturm R., Pollard C., Craig J. Managing Containerized Applications. *Application Performance Management (APM) in the Digital Enterprise*. 2017. P. 177–185. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-804018-8.00013-9>.
3. Silva V. G. d., Kirikova M., Alksnis G. Containers for Virtualization: An Overview. *Applied Computer Systems*. 2018. Vol. 23, no. 1. P. 21–27. URL: <https://doi.org/10.2478/acss-2018-0003>.
4. Resource scheduling for infrastructure as a service (IaaS) in cloud computing: Challenges and opportunities / S. H. H. Madni et al. *Journal of Network and Computer Applications*. 2016. Vol. 68. P. 173–200. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.04.016>.
5. Energy efficient scheduling of virtual machines in cloud with deadline constraint / Y. Ding et al. *Future Generation Computer Systems*. 2015. Vol. 50. P. 62–74. URL: <https://doi.org/10.1016/j.future.2015.02.001>.
6. Cloud Resource Management with a Hybrid Virtual Machine Consolidation Approach / E. Zharikov et al. *2019 IEEE International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT)*, Kyiv, Ukraine, 18–20 December 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/atit49449.2019.9030459>.
7. Khan M. S. A., Santhosh R. Hybrid Optimization Algorithm for VM Migration in Cloud Computing. *Computers and Electrical Engineering*. 2022. Vol. 102. P. 108152. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108152>.
8. Migration-Based Load Balance of Virtual Machine Servers in Cloud Computing by Load Prediction Using Genetic-Based Methods / L.-H. Hung et al. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 49760–49773. URL: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3065170>.
9. Najm M., Tamarapalli V. Towards cost-aware VM migration to maximize the profit in federated clouds. *Future Generation Computer Systems*. 2022. Vol. 134. P. 53–65. URL: <https://doi.org/10.1016/j.future.2022.03.020>.
10. Rani J. K., Lakshmi M. S. Cloud Computing Challenges and Concerts in VM Migration. *International Conference on Mobile Computing and Sustainable Informatics*. Cham, 2020. P. 135–142. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-49795-8\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-030-49795-8_12).
11. Katal A., Choudhury T., Dahiya S. Comparison and Analysis of Container Placement Algorithms in Cloud Data Center. *Emerging Trends in Expert Applications and Security*. Singapore, 2023. P. 239–252. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-1946-8\\_22](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1946-8_22).

12. CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms / R. N. Calheiros et al. *Software: Practice and Experience*. 2010. Vol. 41, no. 1. P. 23–50. URL: <https://doi.org/10.1002/spe.995>

13. Smimite O., Afdel K. Containers Placement and Migration on Cloud System. *International Journal of Computer Applications*. 2020. Vol. 176, no. 35. P. 9–18. URL: <https://doi.org/10.5120/ijca2020920493>

Performance Evaluation of Virtual Machine and Container-Based Migration Technique / A. Bhardwaj et al. *Proceedings of Data Analytics and Management*. Singapore, 2024. P. 551–558. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-6544-1\\_41](https://doi.org/10.1007/978-981-99-6544-1_41)

Received 23.06.2024.  
Accepted 27.06.2024.

### ***An approach to migrations in the container placement task***

*The article examines the importance of container migration within the context of container placement tasks in cloud data centers. Cloud computing offers organizations significant benefits such as flexibility, scalability, and reduced costs for equipment, energy, and maintenance. Cloud providers face the challenge of not only efficiently placing containers initially but also dynamically reallocating them, along with virtual machines, in response to changing demands and workloads. This necessitates the development and application of migration algorithms. The study analyzes how migration is a critical component for ensuring optimal resource use, maintaining high service availability, and reducing service level agreement (SLA) violations. The research aims to enhance the productivity of cloud data centers in the task of container placement by utilizing container migration algorithms. This objective is driven by the need for cloud providers to use their resources effectively to provide higher quality service and maintain competitive pricing. The use of migrations prevents overloading or underloading of servers and virtual machines, which is especially important in the highly dynamic environment of cloud computing. The research developed a hybrid migration algorithm that includes the migration of both containers and virtual machines. Mathematical aspects of the container placement task are described, and the migration algorithm is detailed. Experiments showed that implementing this algorithm reduces operational costs by 24% compared to traditional methods that do not use migration, and by 9% compared to less flexible migration strategies. There was also a demonstrated reduction in SLA violation times by 40%, indicating improvements in service quality and reliability of cloud services. The conclusions of this study confirm that container and virtual machine migration is necessary for effective management of dynamic resources in cloud data centers in the context of container placement tasks.*

*Keywords: container virtualization, migration, cloud provider, data center, virtual machine, optimization, control method, algorithm.*

**Сопов Олексій Олександрович** – аспірант кафедри інформатики та програмної інженерії, асистент, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Жаріков Едуард В'ячеславович** – завідувач кафедри інформатики та програмної інженерії, д.т.н, Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Oleksii Sopov** – PhD student of the Department of Computer Science and Software Engineering, assistant, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

**Zharikov Eduard** – Head of the Department of Computer Science and Software Engineering, Doctor of Technical Sciences, Professor, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## ШТУЧНИЙ ІНТЕЛЕКТ У СФЕРІ ВІЙСЬКОВОЇ ЛОГІСТИКИ

*Анотація.* Величезні потоки динамічно змінюваних даних про наявні логістичні процеси у військовій галузі потребують своєчасного врахування, керування та оптимізації. Застосування штучного інтелекту у сфері військової логістики допомагає оптимізувати прийняття швидких та ефективних рішень при реалізації логістичних процесів. Логістика під час війни є ключовою для успіху військових операцій, адже стосується технічного і тилового забезпечення, транспортування зброї та амуніції, постачання продовольства, зв'язку тощо. Пошук ефективних шляхів щодо швидкої та ефективно оптимізації і мінімізації ризиків логістичних військових процесів є вельми актуальним. У статті досліджено роль ШІ в сучасному трансформаційному розвитку військової логістики, проаналізовано сфери можливого застосування ШІ у цій галузі, оскільки глобальні військові стратегії все більше залежать від надійності та гнучкості систем ланцюгів поставок.

*Ключові слова:* штучний інтелект (ШІ), технології ШІ, військовий ШІ, військова логістика, ризики, машинне навчання, нейронні мережі.

**Постановка проблеми.** Застосування штучного інтелекту (ШІ, Artificial Intelligence, AI) у сфері військової логістики допомагає оптимізувати прийняття швидких та ефективних рішень щодо технічного і тилового забезпечення, транспортування зброї та амуніції, постачання продовольства, зв'язку, адже комбінація цих складових є ключовою для успіху військових операцій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У статті [1] узагальнено досвід країн – учасниць НАТО, насамперед США, щодо формулювання напрямків досліджень з використання технологій ШІ у логістичних системах Збройних Сил та міжнаціональних військових формувань. Дослідження [2] розглядає специфіку застосування ШІ у сфері військової логістики саме у контексті технічних засобів служб тилу. Автори статті [3] проілюстрували характеристики та основні технології, що використовуються в логістиці 4.0, зосереджуючись на використанні ШІ як інструмента прогнозування військових операцій. Дослідження [4] оцінює баланс між покращеними можливостями логістики та складнощами, створеними цими технологіями. Загалом сфера технологічної оптимізації управління військовими ланцюгами поставок стає предметом широкого академічного вивчення та досліджень, що відображає її критичну роль у забезпеченні ефективності сучасних військових операцій, коли технологічний прогрес, геополітичні зрушення та нові військові доктрини постійно змінюють ландшафт логістики.

**Мета дослідження:** проаналізувати роль ІІІ в сучасному трансформаційному розвитку військової логістики, розглянути сфери можливого застосування ІІІ у цій галузі, оскільки глобальні військові стратегії все більше залежать від надійності та гнучкості систем ланцюгів поставок.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Логістика в армії охоплює багато різних функцій своєчасного постачання різної номенклатури озброєння, боєприпасів, військової техніки, а також її підготовки (ремонт) і зберігання. А отже, величезні потоки динамічно змінюваних даних про наявні логістичні процеси у військовій галузі потребують своєчасного врахування, керування та оптимізації. Така задача є доволі складною для будь-якого керівництва, оскільки потребує врахування численних чинників з визначенням та врахуванням можливих ризиків, у тому числі через непередбачені обставини за умов воєнного стану. Саме логістичні помилки можуть спричинити невдачі на полі бою, значні втрати і збитки, тяжкі соціальні та економічні наслідки.

З іншого боку, при обслуговуванні численних заявок військових частин і підрозділів щодо постачання зброї, запчастин, палива, амуніції, продовольства у будь-якої армії є велика проблема можливого виникнення сумнівних транзакцій через людську недбалість, шахрайство, марнотратство, зловживання та корупцію [5]. Тому автоматизація та оптимізація контролю величезних обсягів військової логістики є дуже важливою задачею будь-якої держави. Застосування для управління ланцюгом поставок технологій ІІІ і машинного навчання дозволяє перевірити та впорядкувати великі масиви даних для ідентифікації та виявлення підозрілих постачальників [6]. Вже зараз технології ІІІ у військовій логістичній мережі поступово замінюють людину з позиції стабілізації певних номінальних функцій, тим самим дозволяють пришвидшити логістичний процес і зробити його більш гнучким.

Застосування технологій ІІІ у різних секторах військової логістики формує новий потенціал та можливості:

- автоматизація процесів замовлення, відстеження поставок, складського обліку та розподілу паливних, харчових та речових ресурсів. Це допоможе забезпечити ефективність та точність у військовому постачанні;
- можливість комплексної координації польових штабів і військових частин;
- прогнозування потреб у ресурсах, що дозволить заздалегідь планувати поставки та їх розподіл;
- розробка автономних транспортних засобів та дронів спрощує та прискорює доставку матеріальних цінностей на передову [7];
- оптимізація маршрутів для перевезення вантажів, завдяки аналізу штучним інтелектом географічних даних;
- підвищення боєздатності особового складу за рахунок використання персональних смарт-пристроїв;
- комплексна координація дислокації штабів і військових частин;
- всеосяжний аналіз мінливої ситуації у різних регіонах за умов ведення сучасних бойових дій, ефективне використання аналізу дій російських реваншистів [2];
- можливість зашифрованої доставки інформаційних даних [8];
- потенціал автономної роботи за умов непередбачуваних воєнних дій;

- ефективне управління ресурсами та логістичними процесами за рахунок ШІ може надавати аналітичні дані та рекомендації для підтримки прийняття рішень;
- виявлення ризиків та прогнозування можливого нападу та сценаріїв розвитку подій з позицій учасників бойових дій.

Автоматизоване опрацювання та інтелектуальний аналіз великої кількості даних допомагають оптимізувати вирішення питань постачання, транспортування, зв'язку та інших логістичних задач за умов сучасних війн.

Безпілотні апарати можуть автоматизувати рутинні логістичні завдання (транспортування зброї, особового складу, екіпірування, евакуація поранених, доставка боєприпасів, води, продовольства тощо), виконуючи їх швидше та ефективніше за людей. Такі платформи мають суттєві переваги: вони не потребують залучення екіпажу, який може виконувати важливіші завдання; не потребують відпочинку; їхня втрата дешевша за втрату традиційної вантажівки з людьми. З іншого боку, слабкостями автономних транспортних засобів є те, що: деякі платформи для підвищення надійності потребують управління оператором; на маршруті може статися поломка чи то збій системи керування, і тоді вартісна система втрачається або потребує експлуатаційного обслуговування, а поставлена задача залишається не виконаною за реальних бойових умов; ворог може заглушити систему навігації або керування засобами РЕБ і заволодіти нею, тобто є ризик втрати безпілотника від контрзаходів противника. До того ж, вартість таких дронів є доволі високою і може перевищувати вартість вантажівок та їх обслуговування [9].

Через зазначені недоліки набагато більш поширеними у військовій сфері є частково автономні інтелектуальні системи. Такі адаптовані програмні системи функціонують у взаємодії з людиною, більшість з них базуються на простих програмних технологіях ШІ. Прикладами таких засобів є: безпілотні наземні транспортні засоби від компанії Lockheed Martin для транспортування спорядження, зброї, медикаментів і пайків; платформи S-MET від компанії General Dynamics Land Systems, які здатні підтримувати активність до 72 годин і мають радіус дії до 96 км, можуть заряджатися в дорозі і мають вантажопідйомність до 1133 кг [9].

Автономні транспортні засоби для кращого проходження шляху за різних умов використовують різні методи і технології штучного інтелекту: повторювані нейронні мережі (Recurrent Neural Network, RNN), мережі довготривалої короткочасної пам'яті (Long Short-Term Memory, LSTM) і навчання з підкріпленням (Reinforcement Learning, RL) [10]. Спеціальні архітектури нейронної мережі RNN і LSTM здатні інтерпретувати довгі послідовні дані, для яких важливий хронологічний порядок. RL, як потужний інструмент у ML, дозволяє досягати оптимальних результатів у складних середовищах з багатьма правилами та залежностями. У тому самому середовищі людина може бути не в змозі визначити найкращий шлях, навіть маючи чудові знання про навколишнє середовище. Натомість безмодельні алгоритми RL швидко адаптуються до середовища, що постійно змінюється, і знаходять нові стратегії для оптимізації результатів [11]. Крім того, в безпілотних літальних апаратах (БПЛА) для донаведення застосовують технології комп'ютерного зору (Computer Vision, CV), які дозволяють аналізувати відеопотоки в реальному часі, знаходити й іденти-

фікувати об'єкти (автомобілі, людей, артилерію тощо). Тобто в БПЛА штучний інтелект по суті виконує роль цифрового пілота, який прогнозує траєкторію руху об'єкта, розпізнає ціль, концентрується на ній і запам'ятовує її на випадок тимчасового зникнення з поля зору, щоб буди здатним потім відновити полювання.

До категорії роботизованих на базі ШІ військових транспортних засобів відносять різного плану безпілотні апарати: наземні, літальні, підводні, космічні. Наприклад, ШІ, закладений в операційну систему Lattice, автономного підводного човна Ghost Shark від австралійської компанії Anduril використовує дані з різних сенсорів, комп'ютерне і машинне навчання [12]. Ще одним прикладом інтеграції ШІ у військову сферу є безпілотний бойовий літак Loyal Wingman, розроблений компанією Boeing у співпраці з Королівськими австралійськими Військово-повітряними силами [13]. Впровадження систем ШІ та інтелектуальних алгоритмів у навігаційні системи сучасних транспортних засобів надають можливості для покращеної геолокації та ідентифікації загроз, забезпечують високоякісне інтегроване радарне попередження, гарну ситуаційну обізнаність для швидкого, оптимального прийняття рішень щодо самозахисту та виконання поставлених задач.

Зазначені технології ШІ неабияк допомагають військовим, забезпечуючи роботу різноманітних типів безпілотників. Тим самим ШІ дозволяє оптимізувати планування логістичних маршрутів, контроль запасів, розподіл ресурсів, підвищуючи ефективність та знижуючи витрати.

**Висновки.** Впровадження технологій ШІ в управління ланцюгом поставок у військовій сфері покращують ефективність, безпеку та гнучкість логістичних операцій. ШІ і глибоке навчання забезпечують швидкий і комплексний аналіз великих обсягів даних, полегшуючи виявлення тенденцій і закономірностей, які інакше могли б залишитися непоміченими. Ці технології надають можливість передбачати результати та оптимізувати рішення в режимі реального часу, тим самим сприяючи кращій адаптованості та реагування в динамічних і постійно мінливих ситуаціях, характерних для військових дій. Використання цих передових технологій у прийнятті рішень може призвести до більшої точності, ефективності та, зрештою, покращення продуктивності. Адже ці технології пропонують інноваційні рішення для традиційних викликів кібервразливості та операційної неефективності через ризик людських помилок, особливо в стресових ситуаціях бойових дій. Завдяки ефективному впровадженню алгоритмів ШІ, військові організації зможуть досягти кращої координації та моніторингу ланцюгів постачання, тим самим забезпечуючи швидке та ефективне реагування в критичних ситуаціях. Водночас такий технологічний прогрес сприяє підвищенню прозорості та підзвітності, що є важливими елементами в контексті військових операцій.

Водночас важливо враховувати можливі ризики та проблеми, пов'язані з впровадженням технологій ШІ через їх складність і потребу розвитку технічних навичок і надійних механізмів безпеки складних цифрових систем. Новітні інтелектуальні технології мають значний вплив на управління ланцюгом постачання у військовій організації, пропонуючи широкі можливості підвищення ефективності та безпеки. Але така еволюція вимагає стратегічного, адаптивного підходу та постійної оцінки ризиків і можливостей. Важливо, щоб військові організації були в курсі технологічних інновацій та активно їх інтегрували, щоб

покращувати свою здатність ефективно реагувати на динамічні виклики сучасного військового середовища.

Аналіз показав, що інтеграція алгоритмів ШІ сприяє не лише оптимізації процесів, а й підвищенню безпеки даних і ресурсів, а також активізації досліджень у сфері оптимізації логістики. Оскільки ця технологія продовжує розвиватися, очікувано, що її застосування у військовому контексті ставатиме все більш складним і поширеним.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Воїнов В.В. Аналіз напрямків розвитку технологій, що базуються на застосуванні штучного інтелекту, в логістиці Збройних Сил України. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2020. № 2(39). С. 132-137. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.39.15>.
2. Maslii O. M., Yaniuk S. V., Ollo V. P., Firsov A. V., Poliashov S. V. Application of artificial intelligence in the field of military logistics in the context of the technical means of logistics services in the modern period. *Collection of scientific works of Odesa Military Academy*. 2023. Vol. 2 (20). P. 131-138. DOI: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.20.131-138>.
3. Castro B.A., Pochmann P.G., Neves E.B. Artificial Intelligence Applications in Military Logistics Operations. *Developments and Advances in Defense and Security*. 2024. Vol. 380. P. 89–100. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-8894-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-99-8894-5_8).
4. Trif, Robert-Cristian. The Impact of Emerging Technologies on Supply Chain Management in the Military Organization. *Review of the Air Force Academy*. 2024. Vol. 21. P. 91-99. DOI: <https://doi.org/10.19062/1842-9238.2023.21.2.12>.
5. DLA Ethics. Defense Logistics Agency. URL: <https://www.dla.mil/General-Counsel/Ethics> (date of access: 20.06.2024).
6. Artificial Intelligence for Military Logistics – Current Applications. URL: <https://emerj.com/ai-sector-overviews/artificial-intelligence-military-logistics/> (date of access: 20.06.2024).
7. Трофименко О.Г., Кіх Я.Т. Використання штучного інтелекту у військовій технології. *Інформаційне суспільство: проблеми та перспективи* : матер. ІХ всеукр. наук.-практ. конф. (24 травня 2024). Одеса, 2024. С. 76-79. DOI: <https://doi.org/10.32837/11300.27842>
8. Трофименко О. Г., Яремчук М. В. Штучний інтелект у військовій сфері. *Кіберпростір в умовах війни та глобальних викликів ХХІ століття*: теорія та практика: матер. міжнар. наук.-практ. конф. Одеса, 24 листопада 2023 р. Одеса: НУ «ОЮА», 2023. С. 144-148. DOI: <https://doi.org/10.32837/11300.27179>.
9. Ground Combat Platforms: New Battlefield Player. URL: <https://mil.in.ua/en/articles/ground-combat-platforms-new-battlefield-player/> (date of access: 20.06.2024).
10. Трофименко О.Г., Кіх Я.Т. Застосування алгоритмів штучного інтелекту для військових задач. *Сучасні технології в енергетиці, електромеханіці, системах управління та машинобудуванні*: матер. VI всеукр. наук.-практ. інтернет-конференції. Харків, 06-07 грудня 2023 р. Харків: ННППІ УПА. С. 28-29. URL: <https://www.nnppi.in.ua/index.php/abit/2-uncategorised/270-naukovi-konferentsiyi> (дата доступу: 20.06.2024).
11. What is Reinforcement Learning? URL: <https://aws.amazon.com/what-is/reinforcement-learning/> (date of access: 20.06.2024).
12. ANDURIL. URL: <https://www.anduril.com/> (date of access: 20.06.2024).

13. MQ-28. URL: <https://www.boeing.com/defense/mq28#overview>. (date of access: 20.06.2024).

#### REFERENCES

1. Voinov V.V. Analysis of directions for the development of technologies based on the application of artificial intelligence in the logistics of the Armed Forces of Ukraine. *Science and technology of the Air Force of the Armed Forces of Ukraine*. 2020. Vol. 2(39). P. 132–137. DOI: <https://doi.org/10.30748/nitps.2020.39.15>.
  2. Maslii O. M., Yaniuk S. V., Ollo V. P., Firsov A. V., Poliashov S. V. Application of artificial intelligence in the field of military logistics in the context of the technical means of logistics services in the modern period. *Collection of scientific works of Odesa Military Academy*. 2023. Vol. 2 (20). P. 131-138. DOI: <https://doi.org/10.37129/2313-7509.2023.20.131-138>
  3. Castro B.A., Pochmann P.G., Neves E.B. Artificial Intelligence Applications in Military Logistics Operations. *Developments and Advances in Defense and Security*. 2024. Vol. 380. P. 89–100. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-99-8894-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-99-8894-5_8).
  4. Trif, Robert-Cristian. The Impact of Emerging Technologies on Supply Chain Management in the Military Organization. *Review of the Air Force Academy*. 2024. Vol. 21. P. 91-99. DOI: <https://doi.org/10.19062/1842-9238.2023.21.2.12>.
  5. DLA Ethics. Defense Logistics Agency. URL: <https://www.dla.mil/General-Counsel/Ethics> (date of access: 20.06.2024).
  6. Artificial Intelligence for Military Logistics – Current Applications. URL: <https://emerj.com/ai-sector-overviews/artificial-intelligence-military-logistics/> (date of access: 20.06.2024).
  7. Trofymenko O.G., Kikh Y.T. Application of artificial intelligence in military technologies. In: *9th All-Ukrainian scientific and practical conference “Information society: problems and prospects”*, Odesa, May 24, 2024. P. 76-79. DOI: <https://doi.org/10.32837/11300.27842>.
  8. Trofymenko O. G., Yaremchuk M. V. Artificial intelligence in the military sphere. In: *International scientific and practical conference “Cyberspace in conditions of war and global challenges of the 21st century: theory and practice”*, Odesa, November 24, 2023. P. 144-148. DOI: <https://doi.org/10.32837/11300.27179>.
  9. Ground Combat Platforms: New Battlefield Player. URL: <https://mil.in.ua/en/articles/ground-combat-platforms-new-battlefield-player/> (date of access: 20.06.2024).
  10. Trofymenko O.G., Kikh Y.T. Application of artificial intelligence algorithms for military tasks. In: *6th All-Ukrainian scientific and practical Internet conference “Modern technologies in energy, electromechanics, control systems and mechanical engineering”*, Kharkiv, December 06-07, 2023. P. 28-29. URL: <https://www.nnppi.in.ua/index.php/abit/2-uncategorised/270-naukovi-konferentsiyi> (date of access: 20.06.2024).
  11. What is Reinforcement Learning? URL: <https://aws.amazon.com/what-is/reinforcement-learning/> (date of access: 20.06.2024).
  12. ANDURIL. URL: <https://www.anduril.com/> (date of access: 20.06.2024).
- MQ-28. URL: <https://www.boeing.com/defense/mq28#overview>. (date of access: 20.06.2024).

Received 23.06.2024.  
Accepted 27.06.2024

***Artificial intelligence applications in military logistic***

*Huge flows of dynamically changing data about existing logistics processes in the military industry require timely consideration, management, and optimization. Artificial intelligence in military logistics helps to optimize the adoption of quick and effective decisions in the implementation of logistics processes. Logistics during war is key to the success of military operations, as it concerns technical and rear support, transportation of weapons and ammunition, food supply, communications, etc. The search for effective ways to quickly and effectively optimize and minimize the risks of logistical military processes is very relevant. The paper is devoted to the research of the role of AI in the modern transformational development of military logistics as well as analysis of the areas of possible application of AI in this branch, as global military strategies increasingly depend on the reliability and flexibility of supply chain systems. Automated processing and intelligent analysis of a large amount of data help to optimize the solution of supply, transportation, communication, and other logistical problems under the conditions of modern wars. Applying AI and machine learning technologies to supply chain management allows you to examine and organize large data sets to identify and reveal suspicious suppliers. Unmanned vehicles can automate routine logistical tasks (transportation of weapons, personnel, equipment, evacuation of the wounded, delivery of ammunition, water, food, etc.), performing them faster and more efficiently than humans. The implementation of AI technologies in military supply chain management improves the efficiency, security, and flexibility of logistics operations. AI and deep learning enable rapid and comprehensive analysis of large volumes of data, making it easier to spot trends and patterns that might otherwise go unnoticed. The analysis performed showed that the integration of AI algorithms helps not only to optimize processes, but also to increase the security of data and resources, as well as to intensify research in the field of logistics optimization.*

*Keywords: artificial intelligence (AI), AI technologies, military AI, military logistics, risks, machine learning, neural networks.*

**Трофименко Олена Григорівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Національного університету «Одеська юридична академія», Orcid ID: 0000-0001-7626-0886.

**Соколов Артем Вікторович**, доктор технічних наук, доцент, професор кібербезпеки Національного університету «Одеська юридична академія», Orcid ID: 0000-0003-0283-7229.

**Логінова Наталія Іванівна** – кандидат педагогічних наук, доцент, завідувачка кафедри інформаційних технологій Національного університету «Одеська юридична академія», Orcid ID: 0000-0002-9475-6188.

**Ахматєєва Ганна Валеріївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки Національного університету «Одеська юридична академія», Orcid ID: 0000-0002-0567-902X.

**Чикунів Павло Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій Національного університету «Одеська юридична академія», Orcid ID: 0000-0003-4959-774412.

**Trofymenko Olena** – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Technologies of the National University "Odessa Law Academy".

**Sokolov Artem** – Doctor of Technical Sciences, Professor at the Department of Cyber Security of the National University "Odessa Law Academy".

**Loginova Nataliia** – PhD, Associate Professor, Head of the Department of Information Technologies of the National University "Odessa Law Academy".

**Akhmametieva Hanna** – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Cyber Security of the National University "Odessa Law Academy".

**Chykunov Pavlo** – PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Information Technologies of the National University "Odessa Law Academy".

## ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИКОНАВЧИХ МЕХАНІЗМІВ ПРИВОДІВ СВЕРДЛОВИННИХ ШТАНГОВИХ НАСОСНИХ УСТАНОВОК

*Анотація.* Найбільш розповсюдженими є балансирні приводи свердловинного штангового глибинного насоса механічної дії, які отримали назву верстатів-качалок [1]. Проте розвиток нових схем виконавчих механізмів свердловинної штангової насосної установки (СШНУ) обумовлює необхідність вибору технічних характеристик, які дозволяють провести порівняльну оцінку нових схем з традиційними балансирними приводами. В науковій праці авторами розроблено методiku вибору необхідних параметрів. Визначено, що для порівняння технічних параметрів приводів СШНУ, як традиційних (балансирих) приводів так і нових конструкцій, необхідно провести розрахунки передаточних функції виконавчого механізму та крутного моменту його кривошипного вала.

Графік крутного моменту кривошипного вала дозволяє розрахувати коефіцієнт форми крутного моменту, застосовуючи однаковий закон навантаження штангової підвіски. Таким чином можна зробити висновок, про споживання потужності двигуном традиційного балансирного приводу чи нової конструкції приводу СШНУ.

*Ключові слова:* верстат-качалка, математична модель, аналог кутової швидкості, аналог кутового прискорення, технічні характеристики, передаточні функції, крутний момент, свердловинна штангова насосна установка.

**Постановка проблеми.** Традиційні схеми виконавчих механізмів верстатів-качалок - балансирні приводи. Так, наприклад, провідна американська компанія LUFKIN (США) широко рекламує балансирні приводи 8 типів розроблених з врахуванням конкретних умов експлуатації, з яких стандартні двоплечеві налічують понад 70 модифікацій, а одноплечеві – 50 [2].

В світі постійно ведеться пошук нових схем приводів СШНУ, які можуть забезпечити видобування нафти з меншими експлуатаційними витратами. Тому, поряд з традиційними схемами виникають нові, до них, наприклад, можна віднести безбалансирих привід ПНКШ, який випускає НВП “Оснастка”, м. Краматорськ, Україна [3].

Для свердловин з високим дебітом нафти пропонується застосування безбалансирих довгоходових приводів СШНУ [4], конструкція виконавчих механізмів яких відрізняється від балансирних.

Також, тривають пошуки заміни балансирного приводу на інші схеми виконавчого механізму, наприклад за рахунок використання гідроприводу [5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Щодо пошуку вдосконалення конструкції виконавчого механізму двоплечих верстатів-качалок написано немало праць в яких автори пропонують різні шляхи їх удосконалення [6,7]. Розроблено велику кількість модифікацій балансирних приводів [2].

Безбалансирні верстати-гойдалки [8] випускаються з навантаженням на головку балансира від 30 до 60кН, з довжинами ходу від 3,5 до 6м, що перевищує максимальну довжину ходу балансирних приводів. Використання більших довжин ходу дозволяє видобувати ту ж кількість рідини при менших числах подвійних ходів глибинного насоса, що знижує витрати на видобування нафти.

Довгоходовий ланцюговий привід свердловинного штангового насоса [4] містить стійку з барабаном, раму ходового блоку, який з'єднаний поворотним кулаком з ланцюговою передачею та дозволяє працювати з більшими навантаженнями та довжинами ходів.

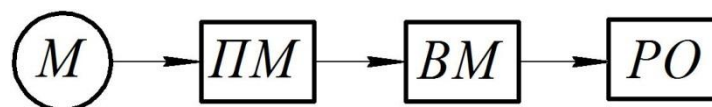
Оскільки схеми виконавчих механізмів балансирних, безбалансирних та довгоходових приводів конструктивно відрізняються між собою, але їх призначення спільне – приводити в зворотньо-поступальний рух плунжер глибинного насоса, який відкачує нафту зі свердловини, то виникає необхідність у виборі параметрів, які б дозволили проводити їх порівняльну оцінку.

**Мета і завдання досліджень.** Метою даної роботи є вибір параметрів для порівняння технічних показників приводів штангових насосних установок.

**Матеріали, методи та методики досліджень.** Основні технічні показники, які виробники вказують в шифрі приводу СШНУ є його вантажопідйомність (кН) , крутний момент на валу кривошипа (кН·м) та довжина ходу штангової підвіски (м).

За першими двома показниками автором [9] запропонований метод обчислення коефіцієнтів функціональних апроксимуючих залежностей, який порівнює значення питомої потужності та питомого крутного моменту різних приводів, що дозволяє привести наближену оцінку якості привода.

Для вибору необхідних технічних характеристик, з метою порівняння приводів експлуатаційних характеристик СШНУ, розглянемо її блок-схему (рис.1).



*M* – двигун приводу; *ПМ* – передаточний механізм;  
*ВМ* – виконавчий механізм; *РО* – робочий орган

Рисунок 1 – Блок-схема СШНУ

Кожний елемент СШНУ, приведений на блок-схемі характеризується своїми технічними параметрами.

Для електродвигуна приводу можна виділити [11]: його потужність  $P_{\text{дв}}$  (кВт), номінальну частоту обертання його вала  $n_{\text{дв}}$  (об/хв) або кутову швидкість  $\omega_{\text{дв}}$  (рад/с), коефіцієнт корисної дії (К.К.Д), коефіцієнт активної потужності ( $\cos\varphi$ ), струм споживання по навантаженню  $I_n$  (А), коефіцієнт перевантаження  $I_n/I_n$ , напругу живлення  $U$  (В), співвідношення між ма-

ксимальним та номінальним крутними моментами  $T_{max}/T_n$ , співвідношення між пусковим та номінальним крутними моментами  $T_n/T_n$ .

СШНУ відрізняються типом механічних передач в приводі. Так, наприклад, для балансирних верстатів-гойдалок або приводу ПНКШ найчастіше використовують пасову передачу, яка характеризується своїми параметрами [12], та двоступеневий зубчастий редуктор.

Для довгоходового приводу – ланцюгову передачу та редуктор з поворотним кулаком.

Якщо враховувати всі технічні характеристики, то потрібно складати складні математичні моделі.

Проте, з точки зору пришвидшення аналізу можливостей приводів СШНУ, доцільно порівнювати тільки відмінності в характеристиках певних механізмів.

Фактично, різні типів приводів можна порівнювати для одного типу навантаження від РО і однакової довжини його ходу.

Ці характеристики виробники, як правило, вказують в шифрі приводу.

Наприклад, балансирний привід СШНУ виробництва США має шифр [2] C-320D-256-120, який означає С – традиційний (двоплечий) тип балансирного приводу; 320 – максимальний крутний момент редуктора ( $10^3 \cdot \text{дюйм} \cdot \text{фунт}$ ); D – двоступеневий редуктор; 256 – навантаження штангової підвіски (*фунт*); 120 – максимальна довжина ходу (*дюйм*).

Балансирний привід виробництва Румунії, який широко використовується у НГВУ України має шифр UP12T-3-5050, який означає UP – тип балансирного приводу; 12 – навантаження штангової підвіски (*тонн*); 3 – максимальна довжина ходу (*м*), 5050 – максимальний крутний момент редуктора (*H·м*).

Шифр балансирного приводу СК12-2,5-4000, виробництва України, означає: СК – двоплечевий балансирний привід, 12 – навантаження штангової підвіски (*тонн*); 2,5 – максимальна довжина ходу (*м*), 4000 – максимальний крутний момент редуктора (*H·м*).

Міри довжин та ваг у країнах-виробників можуть бути різними, тому для їх порівняння необхідно провести перерахунки, що відповідають міжнародному стандарту ISO [13].

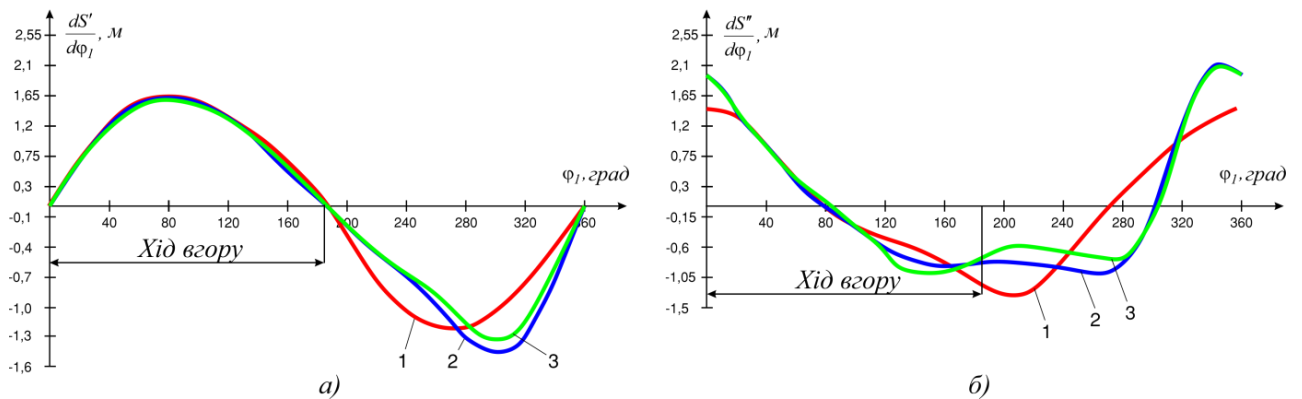
Проте дані, що приводяться в шифрі, показують можливість балансирного приводу і якщо вони подібні, то виникає питання як провести порівняння їх роботи в умовах експлуатації?

**Результати досліджень.** Перша характеристика, яку необхідно забезпечити для РО – це довжина ходу плунжера та його рух з необхідною швидкістю. Виконавчі механізми балансирних приводів різних країн-виробників подібні за схемою, проте відрізняються геометричними параметрами (довжинами ланок).

Оскільки завдання ВМ забезпечити необхідний закон руху штангової підвіски, а отже і РО, то для порівняння зручно користуватись передаточними функціями [10] та аналогами швидкостей (перша передаточна функція) та прискорень (друга передаточна функція). Звичайно для цього потрібно скласти математичну модель, яка дозволить їх обчислити [14].

За їх обчисленнями будуються графіки аналогів переміщення, швидкості та прискорення штангової підвіски. І саме їх форма, а не тільки максимальні значення, важливі для порівняння якості виконавчого механізму (рис.2).

Робочий цикл СШНУ розділяється на дві фази відносно руху штангової підвіски. Перша, рух вгору – коли на привід діють максимальні навантаження, зумовлені вагою штангової колони та рідини, яка знаходиться над плунжером глибокого насосу. Друга – рух штангової підвіски вниз, коли навантаження зменшується і складається тільки з ваги штанг, оскільки вага рідини сприймається колоною насосно-компресорних труб (НКТ).



1 – RM320D-256-120; 2 – СК12-2.5-4000; 3 – UP12Т –3-5500;

Рисунок 2 – Графіки аналогів швидкостей (а) та прискорень (б) балансірних приводів

Виробники приводів намагаються спроектувати виконавчі механізми таким чином, щоб швидкість штангової підвіски при русі вгору була меншою, чим для її руху вниз. Як видно з рис.2а для руху штангової підвіски вгору максимальне значення аналогу швидкості для всіх трьох верстатів-качалок практично рівне і складає 1,65м, тоді як для ходу вниз – суттєво відрізняються: для приводу RM320D-256-120 значення аналогу швидкості найменше і складає 1,21м, для приводу СК12-2.5-4000 – 1,45м (на 19,85 % більше), а для приводу UP12Т –3-5500 – 1,32м (на 10,7 % більше). Якщо розглянути рис.2б, на якому зображені значення аналогів прискорень цих верстатів-качалок, то можна відзначити, що для ходу вгору максимальне значення аналогу прискорення приводу RM320D-256-120 складає 1,4 м, для приводу СК12-2.5-4000 та UP12Т –3-5500– 1,95м (на 39 % більше), для ходу вниз – для приводу RM320D-256-120 мінімальне значення складає -1,35 м, для приводу СК12-2.5-4000 – -1м (на 26% менше), для UP12Т –3-5500 – -0,8м (на 41% менше). Оскільки аналог прискорення вказує на інерційні навантаження, то можна відмітити, що для приводу RM320D-256-120 інерційні навантаження для ходу вгору будуть меншими ніж інших двох приводів, а для ходу вниз – більшими.

Іншою важливою характеристикою для порівняння є крутний момент, який діє на валу кривошипа верстата-качалки. Це пояснюється тим, що для зменшення енергоспоживання та навантаження механічних передач привода використовується зрівноважування балансірними противагами, гідравлічними або пневматичними механізмами, і про якість такого зрівноваження можна говорити аналізуючи графіки крутного моменту кривошипного вала.

Якість зрівноважування буде тим кращою, чим ближче будуть співпадати форми графіків швидкостей штангової підвіски та зрівноважуючих механізмів. Сумарний момент від сили, що діє на штангову підвіску, приведений до кривошипа, розраховується за наступною формулою [15]

$$M_{зв}^o(\varphi) = M_F(\varphi) - M_{np}(\varphi), \quad (1)$$

де  $M_F(\varphi)$  - зведений до кривошипа момент від сили корисного опору, яка діє в точці підвісу штанг;

$M_{np}(\varphi)$  - зведений до кривошипа момент від ваги противаг, які знаходяться на кривошипі.

Рівняння (1) можемо записати як

$$M_{зв}^o(\varphi) = F_{ko} \cdot \frac{V_F}{\omega_1} - \left( G_{np} \cdot r_{np} + G_{кр} \cdot \frac{r_{кр}}{2} \right) \cdot \cos(\varphi), \quad (2)$$

де,  $F_{ko}$  – сила корисного опору, яка діє на штангову підвіску виконавчого механізму;

$V_F$  – швидкість штангової підвіски;

$\omega_1$  – кутова швидкість кривошипа;

$G_{кр}, G_{np}$  – вага кривошипа та кривошипних противаг;

$r_{кр}, r_{np}$  – відстань розміщення центру мас кривошипа та кривошипних противаг.

При ідеальному зрівноважуванні  $M_{зв}^o(\varphi) = 0$ , а це можливо якщо

$$F_{ko} \cdot \frac{V_F}{\omega_1} = \left( G_{np} \cdot r_{np} + G_{кр} \cdot \frac{r_{кр}}{2} \right) \cdot \cos(\varphi), \quad (3)$$

Права частина рівняння – це момент, який створюють противаги і він змінюється за законом косинуса, відповідно якщо в лівій частині рівняння швидкість  $V_F$  також буде відповідати цьому закону, то якість зрівноважування буде найкращою.

Відповідно до рис.2а форма аналога швидкості приводу RM320D-256-120 буде найкраще відповідати гармонійному закону, тобто можна спрогнозувати що і момент на кривошипі буде найменшим.

ККД електродвигуна можна оцінити згідно формули [16]

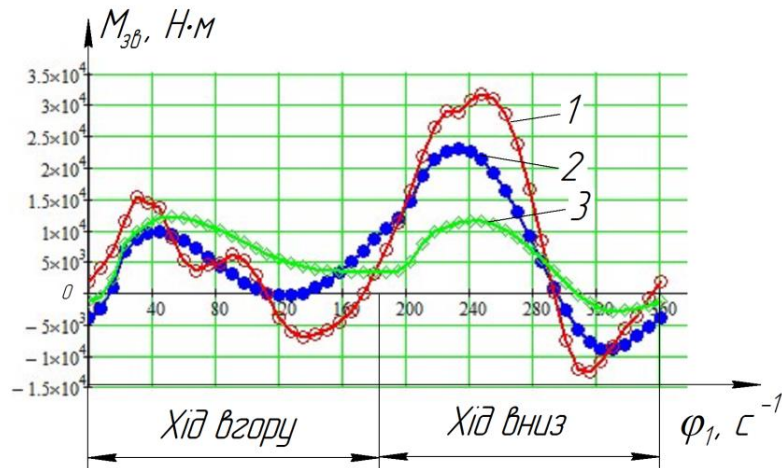
$$\eta_e = \frac{\eta_n}{\eta_n + k_\phi \cdot (1 - \eta_n)}, \quad (4)$$

де,  $\eta_n$  - номінальне значення ККД електродвигуна;

$k_\phi$  - коефіцієнт форми кривої крутного моменту, який діє на валу електродвигуна.

Тобто, на ККД електродвигуна впливає форма крутного моменту, а отже потрібно аналізувати моменти кривошипного вала цих приводів.

Тобто, ще одним важливим фактором для порівняння можливостей приводу виступає форма крутного моменту, що діє на кривошипному валу (рис.3).



1 – традиційного (балансирного) приводу; 2 – модифікованого балансирного приводу з покращеним зрівноваженням; 3 – довгоходового приводу

Рисунок 3 – Крутні моменти кривошипного вала верстата-качалки

Враховуючи залежність (4) та аналізуючи графіки моментів рис.3 можна зробити висновок, що найбільшу потужність буде споживати двигун традиційного балансирного приводу, найменшу – двигун довгоходового приводу.

**Висновки.** Основні технічні характеристики, які виробники вказують в шифрі приводу СШНУ, не дозволяють повністю оцінити можливості приводу в умовах експлуатації.

Тому, для порівняння технічних параметрів приводів СШНУ, як традиційних (балансирних) приводів так і нових конструкцій, необхідно розраховувати наступні параметри:

1 – передаточні функції виконавчого механізму, по яких визначити відхилення форми графіка швидкості штангової підвіски від косинусоїди;

2 – крутний момент кривошипу та коефіцієнт форми крутного моменту, приймаючи однакові форми графіків механічної характеристики - залежності сили корисного опору від переміщення штангової підвіски.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Conventional Beam Pumping Unit. Vital Fluid Systems: веб-сайт. URL: <http://www.eco-live.com.ua> (дата звернення: 25.02.2024).
2. LUFKIN. 2008/2009 GENERAL CATALOG. URL: [https://media.salvex.com/auction/d/1829848/182984728\\_720875.pdf](https://media.salvex.com/auction/d/1829848/182984728_720875.pdf) (дата звернення: 26.02.2024).
3. ТОВ НВП “Оснастка”. URL: <https://www.ua-region.com.ua/13517472> (дата звернення: 26.02.2024).
4. WEATHERFORD. Long-stroke pumping unit. веб-сайт. URL: <https://www.weatherford.com/products-and-services/production-and-intervention/artificial-lift-systems/reciprocating-rod-lift-systems/pumping-units/long-stroke-pumping-unit/> (дата звернення: 26.02.2024).
5. С.В.Наследніков, Д.Ф.Тимків, Р.Г.Онацко Аналіз структурної схеми устаткування для видобутку нафти і її кінематика. Науковий вісник. Івано-Франківськ, 2012. №1(31). с.70-79.

6. Hukun Yang, Jianping Wang, Hui Liu Energy-saving mechanism research on beam-pumping unit driven by hydraulics. PLOS.ONE. April 1. 2021. p.1-16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249244>.
7. Feng Z. M., Tan J. J., Li Q., Fang X. A review of beam pumping energy-saving technologies // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2018. Vol. 8, Issue 1. P. 299–311. URL: <https://doi.org/10.1007/s13202-017-0383-6>.
8. Довгоходові безбалансирні верстати-качалки серії ПНКШ – Приводи штангового насоса. URL: <https://ua.all.biz/uk/dlynnohodove-bezbalansyrnestanky-kachalky-seriyi-g40609> (дата звернення: 29.02.2024).
9. Савчук В. В. Видобування нафти з високим вмістом піску, смол і парафіну із застосуванням спеціальних конструкцій насосів. Науковий вісник ІФНТУНГ. 2016. № 1(40). С. 20-28.
10. Кіницький Я.Т. Теорія механізмів і машин: підручник / Я.Т.Кіницький. – Київ.: Наукова думка, 2002. –663 с.
11. Порівняльні характеристики електродвигунів АІР. URL: <https://enasos.com.ua/blog/sravnitelnye-harakteristiki-elektrovdigatelej-air> (дата звернення: 03.03.2024).
12. Іващенко В.Т. Сенчішак В.М. Розрахунок і конструювання деталей машин: навчальний посібник. Івано-Франківськ: Нова Зоря, 2013. 808с.
13. Міжнародна організація зі стандартизації. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (звернення: 03.03.2024)
14. В. Р. Харун, В.М. Сенчішак В. Я. Попович, Шостаківський І.І. Порівняльна оцінка виконавчого механізму балансирного приводу верстата-качалки оснащеного довгоходовою стійкою. Нафтогазова енергетика. Івано-Франківськ, 2021. №2(36). с.57-67. DOI: 10.31471/1993-9868-2021-2(36)-57-67
15. В.Р.Харун, В.М.Сенчішак, В.Я.Попович, І.І.Шостаківський І.І. Дослідження пускових режимів верстата-качалки. Нафтогазова енергетика. Івано-Франківськ, 2021. №1(35). с.48-59. DOI:10.31471/1993-9868-2021-1(35)-48-59.
16. А.В.Маляр Оптимізація збалансованості верстата-гойдалки електроприводу штангової нафтовидобувної установки // Електротехніка і Електромеханіка – Харків.: НТУ “ХПІ” , 2009. – №3. – С.29-31.

## REFERENCES

1. Conventional Beam Pumping Unit. Vital Fluid Systems: veb-sajt. URL: <http://www.eco-live.com.ua> (data zvernennia: 25.02.2024).
2. LUFKIN. 2008/2009 GENERAL CATALOG. URL: [https://media.salvex.com/auction/d/1829848/182984728\\_720875.pdf](https://media.salvex.com/auction/d/1829848/182984728_720875.pdf) (data zvernennia: 26.02.2024).
- 3.TOV NVP “Osnastka”. URL: <https://www.ua-region.com.ua/13517472> (data zvernennia: 26.02.2024).
- 4.WEATHERFORD. Long-stroke pumping unit. veb-sajt.

URL: <https://www.weatherford.com/products-and-services/production-and-intervention/artificial-lift-systems/reciprocating-rod-lift-systems/pumping-units/long-stroke-pumping-unit/> (data zvernennia: 26.02.2024).

5. S.V.Nasliednikov, D.F.Tymkiv, R.H.Onatsko Analiz strukturnoi skhemy ustatkuvannia dlia vydobutku nafty i ii kinematyka. Naukovyj visnyk. Ivano-Frankivs'k, 2012. №1(31). s.70-79.

6.Hukun Yang, Jianping Wang, Hui Liu Energy-saving mechanism research on beam-pumping unit driven by hydraulics. PLOS.ONE. April 1. 2021. p.1-16. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0249244>.

7.Feng Z. M., Tan J. J., Li Q., Fang X. A review of beam pumping energy-saving technologies // Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2018. Vol. 8, Issue 1. P. 299–311. URL: <https://doi.org/10.1007/s13202-017-0383-6>.

8. Dovhokhodovi bezbalansyrni verstaty-kachalky serii PNKSh – Pryvody shtanhovoho nasosa. URL: <https://ua.all.biz/uk/dlynnohodove-bezbalansyrnestanky-kachalky-seriyi-g40609> (data zvernennia: 29.02.2024).

9. Savchuk V.V. Vydobuvannia nafty z vysokym vmistom pisku, smol i parafinu iz zastosuvanniam spetsial'nykh konstruksij nasosiv. Naukovyj visnyk IFNTUNH. 2016. №1(40). C. 20-28.

10. Kinyts'kyj Ya.T. Teoriia mekhanizmiv i mashyn: pidruchnyk / Ya.T.Kinyts'kyj. – Kyiv.: Naukova dumka, 2002. –663 s.

11.Porivnial'ni kharakterystyky elektrodyhuniv AIR.

URL: <https://enasos.com.ua/blog/sravnitelnye-harakteristiki-elektrovdigatelej-air> (data zvernennia: 03.03.2024).

12. Ivaschenko V.T. Senchishak V.M. Rozrakhunok i konstruiuvannia detalej mashyn: navchal'nyj posibnyk. Ivano-Frankivs'k: Nova Zoria, 2013. 808s.

13. Mizhnarodna orhanizatsiia zi standartyzatsii. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/> (zvernennia: 03.03.2024).

14. V.R. Kharun, V.M. Senchishak V. Ya. Popovych, Shostakivs'kyj I.I. Porivnial'na otsinka vykonavchoho mekhanizmu balansyrnoho pryvodu verstata-kachalky osnaschenoho dovhokhodovoiu stijkoii. Naftohazova enerhetyka. Ivano-Frankivs'k, 2021. №2(36). s.57-67. DOI: 10.31471/1993-9868-2021-2(36)-57-67.

15. V.R.Kharun, V.M.Senchishak, V.Ya.Popovych, I.I.Shostakivs'kyj I.I. Doslidzhennia puskovykh rezhymiv verstata-kachalky. Naftohazova enerhetyka. Ivano-Frankivs'k, 2021. №1(35). s.48-59.DOI:10.31471/1993-9868-2021-1(35)-48-59.

16. A.V.Maliar Optymizatsiia zbalansovanosti verstata-hojdalky elektropryvodu shtanhovoi naftovydobuvnoi ustanovky // Elektrotekhnika i Elektromekhanika – Kharkiv.: NTU “KhPI” , 2009. – №3. – S.29-31.

Received 23.06.2024.  
Accepted 27.06.2024

### ***Comparative assessment of the technical characteristics of executive mechanisms in well rod pumping unit drives***

*Problem statement. The most common type is the mechanical sucker rod-pump units with balanced drives, commonly known as pumpjacks [1]. However, the development of new schemes for the executive mechanisms of the sucker rod-pump unit (SRPU) necessitates the selection of technical characteristics that allow for a comparative assessment of new schemes with traditional bal-*

anced drives. The authors have developed a methodology for selecting the necessary parameters in this research. It has been determined that to compare the technical parameters of SRPU, both traditional (beam) drives and new designs, it is necessary to calculate the transfer functions of the executive mechanism and the torque of its crankshaft. The crankshaft torque graph allows for the calculation of the torque shape coefficient, using a consistent load pattern for the rod suspension. This way, it is possible to conclude the power consumption of the motor in either the traditional beam drive or the new SRPU drive design.

*Key words: beam-pumping unit, mathematical model, analogue of angular velocity, analog of angular acceleration, specifications, transfer functions, torque, sucker rod-pump unit.*

**Харун Віктор Романович** – к.т.н, доцент кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Рачкевич Руслан Володимирович** - д.т.н, професор кафедри технічної механіки, інженерної та комп'ютерної графіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Kharun Viktor Romanovich** – candidate of technical sciences, associate professor, department of technical mechanics, engineering and computer graphics Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas.

**Rachkevych Ruslan Volodymyrovych** - doctor of technical sciences, professor, department of technical mechanics, engineering and computer graphics Ivano-Frankivsk national technical university of oil and gas.

А.С. Швець, В.А. Пророка, О.О. Добродомов, О.В. Кулик, В.А. Солнцев

## РОЗРОБКА СТЕНДУ ВОГНЕВИХ ВИПРОБУВАНЬ РАКЕТНИХ ДВИГУНІВ

*Анотація. Стенди вогневих випробувань є основним засобом для отримання інформації про параметри роботи ракетних двигунів та необхідний ступінь їх надійності на етапі відпрацювання. Основними вимогами, що висувуються до стендів вогневих випробувань є зручність та безпека при їх експлуатації, високий рівень точності отриманих даних експерименту, невисока вартість та доступність елементів конструкції та апаратного забезпечення. Метою роботи є розробка універсального стенду, призначеного для випробувань ракетних двигунів твердого палива та рідинних ракетних двигунів з тягою до 7000 Н. Дані двигуни можуть бути використані у якості складових рушійної установки суборбітальних ракет-носіїв надлегкого і легкого класу, а також представляти собою розгінні блоки або прискорювачі інших типів літальних апаратів. Представлено конструкцію стенду, реалізовану дослідницькою командою “Rocketry agency”, що відповідає заявленим вимогам. Запропоновано заходи, які для поданої конструкції стенду дозволили суттєво знизити негативний вплив ряду факторів на точність вимірювань тяги ракетних двигунів.*

*Ключові слова: стенд вогневих випробувань ракетних двигунів, суборбітальна ракета, відпрацювання об’єктів ракетно-космічної техніки, ракетні двигуни твердого палива, рідинні ракетні двигуни, ракетні прискорювачі літальних апаратів, точність вимірювань, тензодатчик, тиск у камері згорання.*

**Постановка проблеми.** Ракетні двигуни є одними з найскладніших та найважливіших елементів об’єктів ракетної техніки. Процеси, що відбуваються у ракетних двигунах є складними і потребують ретельного дослідження. Розробка ракетного двигуна складається з етапів вибору компонентів ракетного палива, принципової та конструктивно-компонувальної схеми двигуна, матеріалів його конструкцій, розрахунку режимів роботи двигуна, розрахунків на міцність тощо. Для підтвердження роботоздатності рішень прийнятих на даних етапах переходять до етапу відпрацювання ракетних двигунів. Для цього використовують стенди, основною задачею яких є імітація роботи двигуна в умовах максимально наближених до експлуатаційних, отримання необхідної інформації про фізичні параметри, що визначають ефективність з якою даний двигун може виконати поставлену задачу та перевірку надійності його роботи. Стендове відпрацювання дозволяє на порядок скоротити витрати на аналогічне відпрацювання двигуна в умовах реального польоту та значно спростити отримання необхідних даних про результат випробування. Тому, розробка стендів для проведення вогневих випробувань ракетних двигунів є актуальною задачею.

У рамках даної роботи розглядається розробка універсального стенду вогневих випробувань для ракетних двигунів твердого палива (РДТП) та рідинних ракетних двигунів (РРД) з максимально допустимою тягою до 7000 Н. Ракетні двигуни такого класу можуть виступати у якості складових рушійної установки суборбітальних ракет-носіїв надлегкого і легкого класу, а також представляти собою розгінні блоки або прискорювачі інших типів літальних апаратів. Для РРД двигуни з такими параметрами можуть виступати у якості експериментальних установок-демонстраторів для тестування перспективних рідких ракетних палив, що у подальшому можуть бути застосовані у складі більш потужних РРД.

До основних вимог, що висуваються при розробці стенду вогневих випробувань належать:

— зручність експлуатації випробувального обладнання при підготовці та проведенні випробувань;

— забезпечення максимального рівня безпеки технічного персоналу, що бере участь у вогневих випробуваннях при штатних і усіх можливих випадках нештатних ситуацій;

— забезпечення необхідної орієнтації та надійного закріплення засобів випробувань, до яких належать безпосередньо двигун, необхідні стапелі, підвіски, допоміжні агрегати тощо;

— забезпечення максимальної точності вимірювань параметрів, що досліджуються в ході випробувань;

— можливість проведення спостережень та видачі управляючих команд у режимі реального часу у дистанційному режимі;

— мінімум матеріальних та часових затрат на розробку і виготовлення.

Представлений у роботі стенд вогневих випробувань розроблено дослідницькою командою “Rocketry agency”, яка займається розробкою, виготовленням, відпрацюванням та запуском експериментальних зразків дослідницьких та суборбітальних ракет-носіїв легкого та надлегкого класів [1-4]. Діяльність команди здійснюється за активної підтримки Space Lab Noosphere Engineering School та Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Джерело [5] містить основні відомості та методичні підходи до проблем, що виникають при вимірюванні тяги ракетних двигунів під час вогневих випробувань на стендах. Розглянуто питання підвищення точності вимірювань шляхом повного або часткового усунення впливу факторів, вносять похибки при проведенні експерименту.

У роботі [6] проведено розрахунки на міцність та втому стенду вогневих випробувань ракетних двигунів з обмеженням по параметру тяги до 3000 Н методами чисельного моделювання. Представлений у роботі стенд виготовлено з алюмінієвого сплаву, що дає перевагу у меншій його масі, у той же час дана конструкція є значно дорожчою. Доведено, що тривалість життєвого циклу запропонованого стенду різко скорочується при збільшенні величини тяги, що діє на конструкцію – з більш ніж 32 млн циклів при тязі 2000 Н до менш ніж 1 млн циклів при тязі 3000 Н.

У джерелі [7] представлено стенд вогневих випробувань, конструкція якого передбачає встановлення двигуна на стапель, що рухається на лінійному підшипнику, а у якості приладу, що фіксує створену ракетним двигуном тягу виступає тензодатчик балочного типу.

Робота [8] присвячена розробці апаратної частини стенду вогневих випробувань, що представляє собою бездротовий пристрій, що дозволяє забезпечити надійний прийом інформації, отриманої з датчиків під час роботи двигуна.

У дослідженні [9] описано досвід використання різних датчиків вимірювання тиску всередині камери згорання та використання датчиків температури у складі системи аварійного переривання вогневих випробувань.

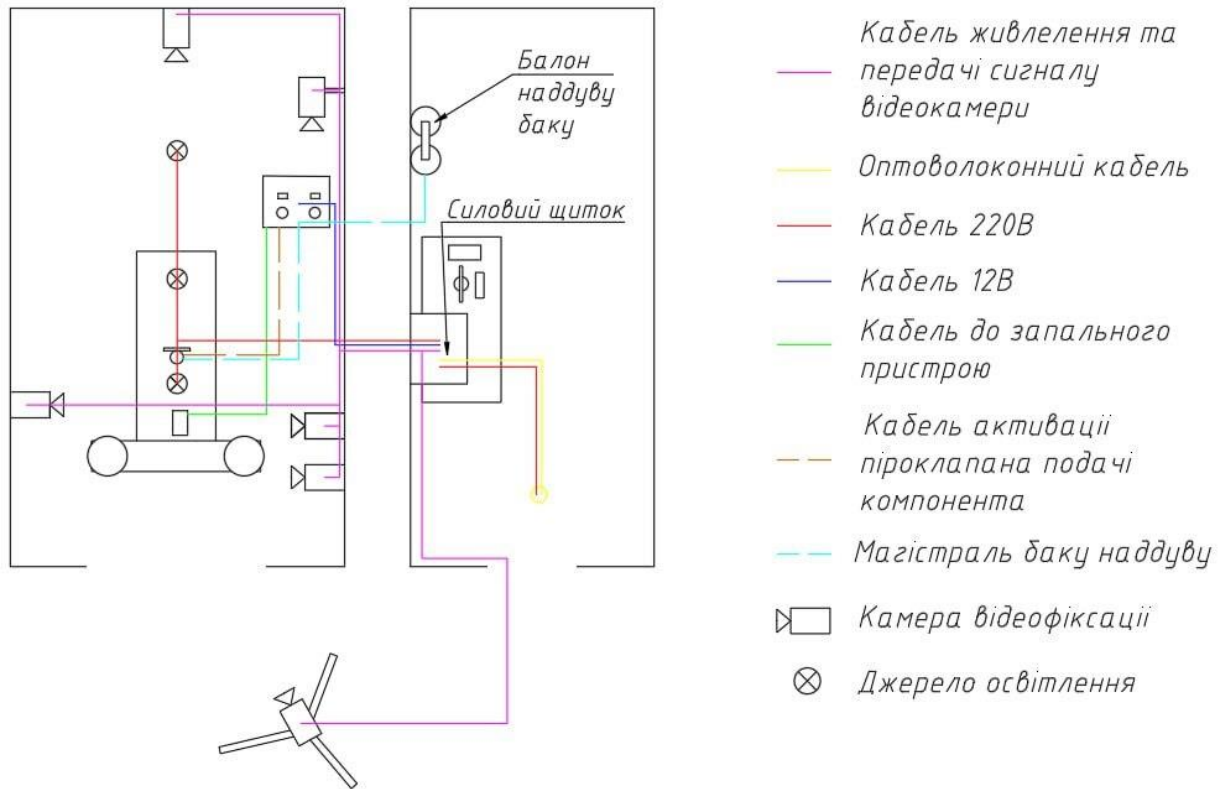
**Мета дослідження.** Розробка стенду для проведення вогневих випробувань твердопаливних та рідиннопаливних двигунів з максимальною тягою до 7000 Н у відповідності до заданих вимог.

**Викладення основного матеріалу дослідження.**

**Основні відомості про розроблений стенд вогневих випробувань.** Розроблений в рамках даної роботи стенд вогневих випробувань складається з наступних основних частин:

- механічної частини;
- датчиків вимірювання;
- системи обробки та запису інформації, отриманої з датчиків вимірювання;
- системи дистанційного керування та спостереження;
- системи подачі палива та наддуву (для РРД).

Для розміщення основної частини стенду вогневих випробувань було обрано приміщення, що представляє собою бункер, заглиблений у землю з трьох боків. Даний бункер розташований нижче рівня будівель, що знаходяться поблизу. Стіни бункера представляють собою дві обичайки зі склопластику товщиною не менше 20 мм, що дозволяє запобігти серйозним руйнуванням у випадку нештатної ситуації, пов'язаної з можливою детонацією двигунної установки. Обичайки розділяють бункер на два приміщення (рис. 1а), в одному з яких розташовано основні механічні частини стенду (рис. 1б) та засоби спостереження, у той час як в іншому знаходиться силовий щиток, та обладнання для прийому, перетворення, обробки та запису даних з датчиків.



а)



б)

Рисунок 1 – Розміщення основних елементів стенду: а) структурна схема; б) приміщення, у якому розташовано основну механічну частину стенду

Для забезпечення вимог щодо безпеки персоналу, що бере участь у проведенні вогневих випробувань усі виконавчі команди надходять із командного пункту, що розташований на безпечній відстані від бункеру. Зв'язок між командним пунктом (рис. 2а) та силовим щитком та системою обробки і запису інформації (рис. 2б), розташованих у бункері, забезпечується за допомогою силового кабелю 220В та оптоволоконних кабелів.



а)

б)

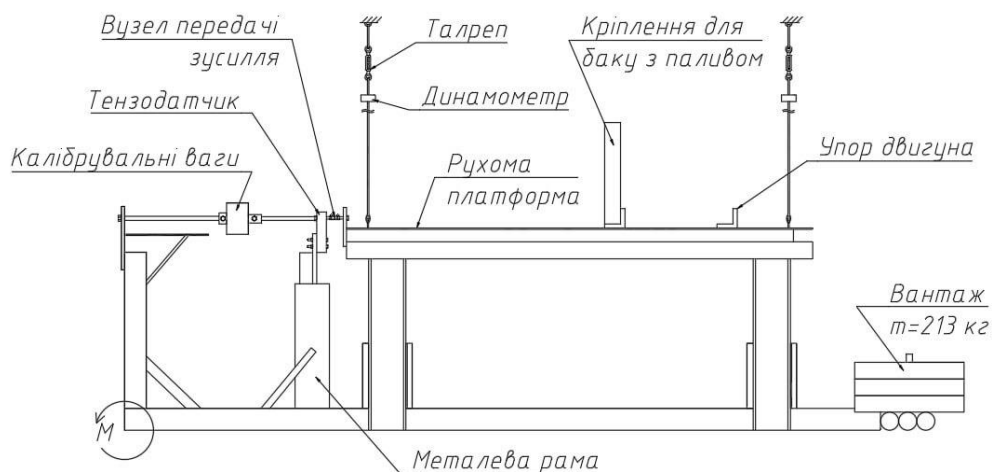
Рисунок 2– Розміщення апаратного забезпечення стенду вогневих випробувань: а) командний пункт; б) силовий щиток та система обробки і запису інформації

Дана система забезпечує віддалену видачу команд на виконавчі пристрої, зокрема приводить у дію запалюючий пристрій двигуна, та дозволяє здійснювати візуальне спостереження та отримувати аудіо сигнал з приміщення, де відбуваються випробування у реальному часі.

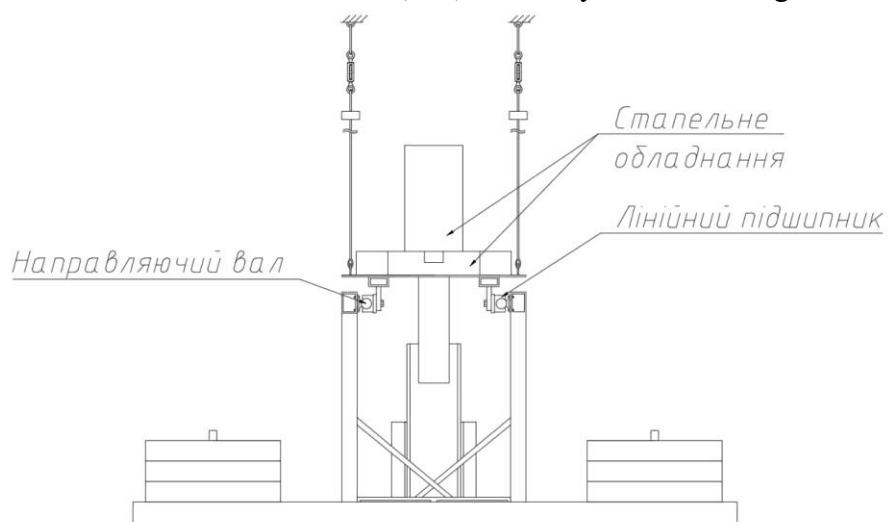
На рисунку 3 представлено схему силової конструкції механічної частини стенду.

У якості матеріалів, що використані в усіх силових конструкціях стенду було обрано металеві профілі, листи та плити необхідних розмірів. Критеріями вибору матеріалів стали міцність, доступність, технологічність та невисока вартість.

Основною конструкцією стенду є металева рама, що прикріплена до землі шляхом зварювання з вертикальними закладними елементами.



а)



б)



в)



г)

Рисунок 3 – Схема механічної частини стенду: а) вид збоку; б) вид спереду; в) стенд під час випробувань РДТП; г) стенд під час випробувань РРД

На раму встановлюються такі основні елементи:

- рухома платформа, що забезпечує передачу тяги від працюючого ракетного двигуна до тензодатчика;
- вузол передачі зусилля між рухомою платформою та тензодатчиком;
- стапельне обладнання, що забезпечує кріплення двигуна до рухомої платформи,
- система для виконання калібрування тензодатчика.

Під час роботи ракетного двигуна навколо нижньої передньої лінії рами створюється перекидний момент (рис 3а). Для його компенсації у задній частині стенда закріплено вантаж загальною масою 213 кг.

Рухома платформа представляє собою зварену з профілів прямокутну раму, на яку зверху аналогічно закріплено металеву плиту. Переміщення рухомої платформи забезпечується через лінійні підшипники, що рухаються по направляючих валах (рис. 4).

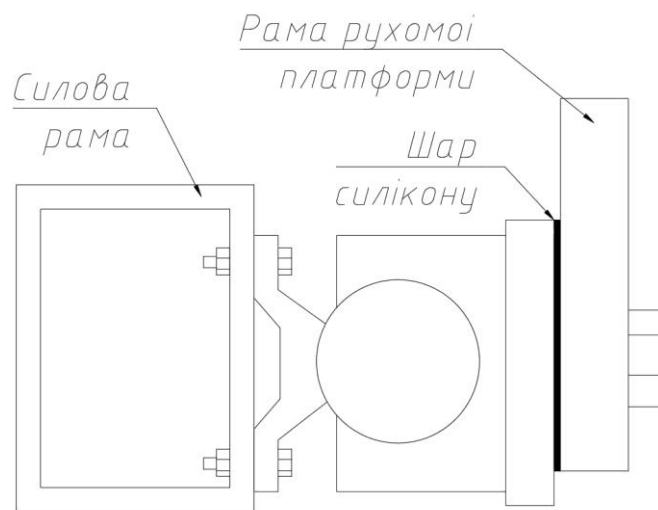


Рисунок 4 – Схема механізму кріплення рухомої платформи до стаціонарно закріпленої силової рами

На рухому платформу за допомогою болтових з'єднань встановлюється стапельне обладнання, задачею якого є кріплення та орієнтація ракетного двигуна на випробувальному стенді. Завдяки обраній конструкції рухомої платформи існує можливість зміни положення та орієнтації стапельного обладнання у широкому діапазоні.

**Реалізовані заходи щодо підвищення точності вимірювань тяги ракетних двигунів.** На результати вимірювання тяги фізично впливають сили тертя та інерції, що виникають на при русі платформи під час роботи ракетного двигуна; конструкція вузла передачі зусилля; деформації та геометричні неточності конструкцій стенду, що виникають при виготовленні та подальшій експлуатації стенду. Для зменшення впливу даних факторів було здійснено ряд заходів поданих нижче.

1) При проведенні перших випробувань рухома платформа сполучалася з тензодатчиком через жорсткий стрижень. Це призвело до появи динамічних ефектів у вузлі кріплення (рис. 5а), що у свою чергу, викликали вертикальні деформації тензодатчика. Через даний ефект на графіку тяги спостерігалися піки, що суттєво спотворювали результат (рис. 5б). Для

вирішення цієї проблеми було застосовано кріплення через гумову трубку, що виступає у ролі демпфуючого елемента. Як показали наступні випробування, реалізація даного рішення дозволила значною мірою вирішити дану проблему (рис. 5в).

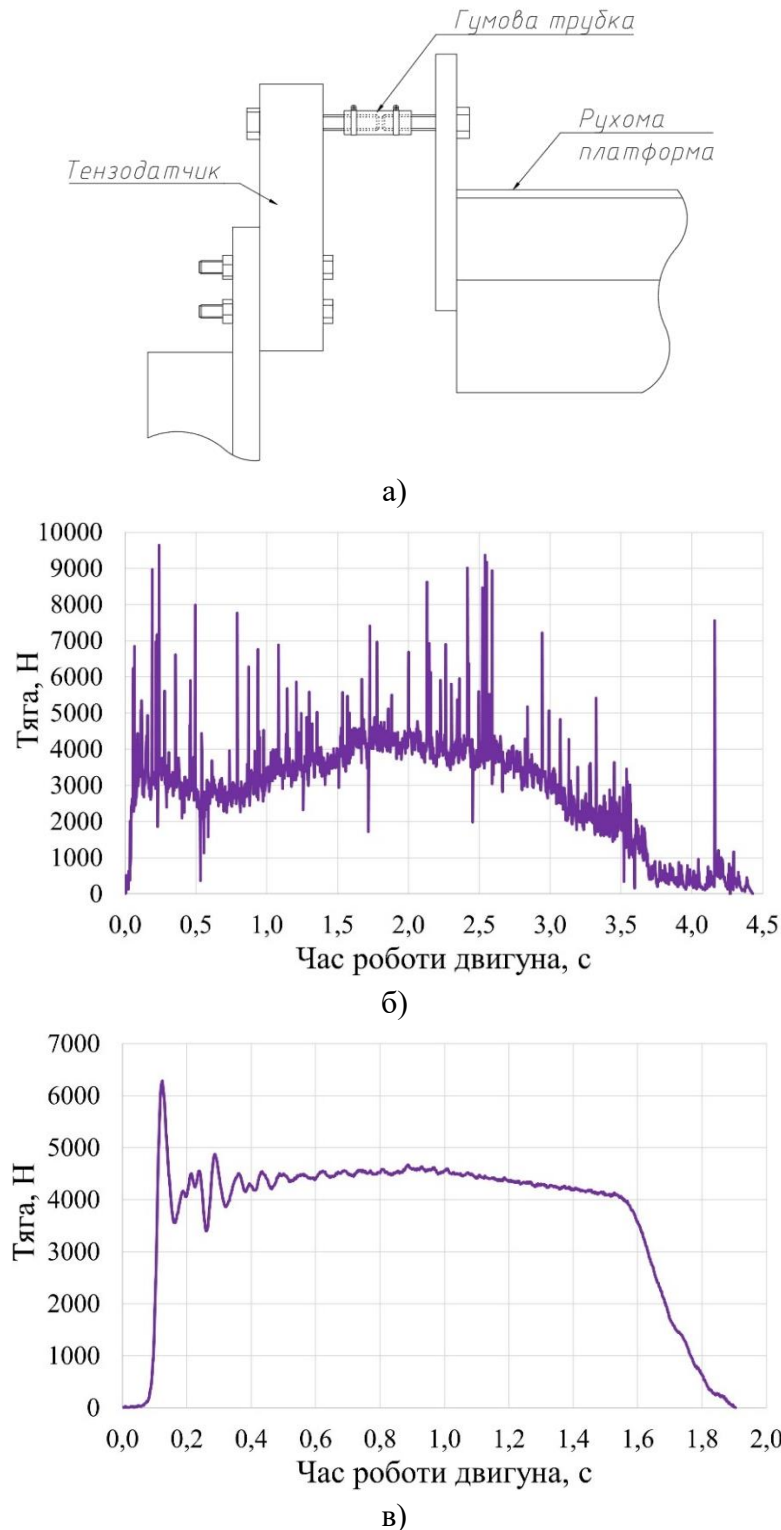


Рисунок 5 – Вирішення проблеми зашумленості у вузлі передачі зусилля:  
а) схема запропонованого вузла; б) результат отриманий до реалізованих заходів  
в) результат отриманий після реалізованих заходів



У процесі експлуатації тензодатчика із часом його шкала вимірювань може змінюватися через залишкові деформації корпусу, що сполучений із тензорезисторами. Особливо суттєво змінюється положення нуля на шкалі. Для того, щоб скоригувати вплив цього фактору на результати вимірювань у складі стенду передбачена система для проведення калібрування тензодатчика. Калібрування проводяться перед і після кожного вогневого випробування двигуна. Процес калібрування полягає у реєстрації даних тензодатчика при поступовому його ступінчастому навантаженні заданим зусиллям, що фіксується за допомогою динамометра, протягом фіксованого часу у порядку наростання, а потім у зворотному порядку. Таким чином утворюється графік у вигляді сходинок, розташованих симетрично відносно максимального прикладеного калібрувального зусилля (рис. 7). Після цього для кожного із отриманих даних ставиться у відповідність прикладене у відповідний момент зусилля і будується залежність коефіцієнта переводу отриманих даних у фізичні одиниці вимірювання тяги ракетного двигуна. Порівняння між даними отриманими для еквівалентної величини зусилля у порядку наростання і спадання дозволяє оцінити гістерезис при вимірюванні величини тяги.

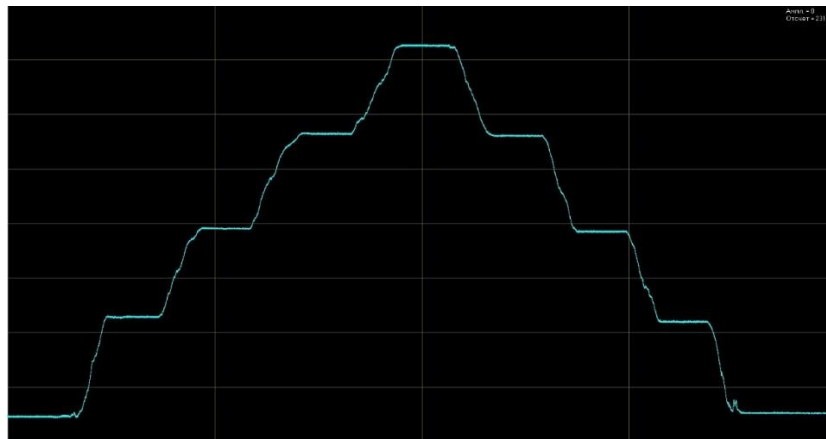


Рисунок 7 - Дані з реєстратора при калібруванні тензодатчика

Для вимірювання тиску всередині камери згорання застосовується датчик тиску ВТС-22-250В-А-Г1/4-С-С30 [11] (рис. 6б), підключений до спеціального відводу, що сполучається з отвором невеликого діаметра у передньому фланці ракетного двигуна. Заявлена паспортна точність вимірювання для обраного датчика тиску складає  $\pm 0,5\%$  від діапазону вимірювань. Оскільки для даного датчика діапазон вимірювань складає від 0 до 250 бар, тоді точність вимірювань тиску у камері згорання дорівнює  $\pm 1,25$  бар.

При проведенні випробувань РРД може виникати потреба у встановленні та контролі температур зовні камери згорання та паливних баках. Для цього у складі стенду передбачена наявність системи підігріву паливних баків та встановлено два датчики температури REX-C100 [12] (рис. 6в), що підключаються до конструкцій двигунної установки через відповідні термопари.

**Висновки.** Розроблений стенд вогневих випробувань ракетних двигунів, що представлений у даній роботі, відповідає основним вимогам, що пред'являються до таких конструкцій та має додаткові можливості та переваги у порівнянні з аналогічними зразками. Ужиті в процесі розробки стенду заходи дозволили суттєво зменшити вплив факторів, що

вносили суттєві похибки в результати вимірювань. Обрана конструктивно-силова схема, що дозволяє вимірювати такі параметри роботи ракетного двигуна як тяга, тиск у камері згорання, а також температуру в обраних точках конструкції двигуна, створює передумови для комплексної оцінки процесу роботи двигунної установки.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Evaluation of the results of the flight tests of the small research rocket K80 Meteo 7000 on the way to the creation of the Ukrainian family of suborbital launch vehicles [Electronic resource] / Vladyslav Proroka, Mykola Dron, Oleksii Kulyk, Vadym Solntsev, Svitlana Klymenko // EUREKA: physics and engineering. – 2023. – No. 5. – P. 67–79. <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.003106>.
2. Ways of improvement of suborbital launch vehicles [Electronic resource] / Oleksii Kulyk, Mykola Dron, Vadym Solntsev, Svitlana Klymenko, Vladyslav Proroka, Vitaly Yemets // 72nd International Astronautical Congress. Technical programme IAC-21-D2,IP,4,x64134. Dubai, United Arab Emirates, 25–29 October 2021.
3. Perspectives for the use of new solutions in the creation of suborbital launch vehicles [Electronic resource] / Vladyslav Proroka, Mykola Dron, Oleksii Kulyk, Vadym Solntsev, Svitlana Klymenko, Olexandr Dobrodomov // 73rd International Astronautical Congress. Technical programme IAC-22-D2,IP,7,x69646. Paris, France, 18–22 September 2022.
4. Possibilities for expanding the application areas of suborbital launch vehicles [Electronic resource] Vladyslav Proroka, Mykola Dron, Oleksii Kulyk, Vadym Solntsev, Anatolii Abaturon, Alexandr Golubek, Olexandr Dobrodomov // 74nd International Astronautical Congress. Technical programme IAC-23-D2,IP,6,x77509. Baku, Azerbaijan, 2–6 October 2023.
5. Freeman II C. W. Solid rocket motor static fire test stand optimization: load cell effects and other uncertainties [Electronic resource]: Theses / Freeman II Charles W. – HUNTSVILLE, ALABAMA, 2018. – 78 p. URL: <https://www.proquest.com/openview/6ff576afbb47853f2241e31975cebe19/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51922&diss=y>.
6. Lasinta Ari Nendra Wibawa. Static stress analysis and fatigue life prediction of rocket motor test stand using numerical simulation [Electronic resource] / Lasinta Ari Nendra Wibawa // R.E.M. (rekayasa energi manufaktur) jurnal. – 2021. – Vol. 6, no. 2. – P. 9–13. <https://doi.org/10.21070/r.e.m.v6i2.1533>.
7. Design of a lab-scale hybrid rocket test stand [Electronic resource] / James C. Thomas, Jacob M. Stahl, Gordon R. Morrow, Eric L. Petersen // 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, UT, 25–27 July 2016. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/epdf/10.2514/6.2016-4965>.
8. Alves H. Wireless device to measure thrust and pressure in a rocket test bench / Henrique Alves, Alexandre Reis, Júlio Santos // International Congress of Engineering | Innovation and Sustainability Praxis, Covilhã, Castelo Branco, 1 November 2022.
9. McFarland. Small-Scale static fire tests of 3D printing hybrid rocket fuel grains produced from different materials [Electronic resource] / McFarland, Antunes // Aerospace. – 2019. – Vol. 6, no. 7. – P. 81. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/aerospace6070081>.
10. CZL 803 shearbeam loadcell | best loadcell dealer seegate loadcell [Electronic resource] // Seegate Loadcell. URL: <https://seegateloadcell.com/product/czl-803-shearbeam-loadcell/>.

11. BCT 22 Pressure Transmitter || ATEK || Made in Türkiye – ATEK Sensor Technologies Inc. [Electronic resource] // ATEK Sensör. URL: <https://ateksensor.com/en/product/bct-22-pressure-transmitter-atek-made-in-turkiye/>.
12. REX-Century series | RKC Instrument Inc. [Electronic resource] // RKC Instrument Inc. URL: <https://www.rkcinst.co.jp/english/products/4041/>.

#### REFERENCES

1. Evaluation of the results of the flight tests of the small research rocket K80 Meteo 7000 on the way to the creation of the Ukrainian family of suborbital launch vehicles [Electronic resource] / Vladyslav Proroka, Mykola Dron, Oleksii Kulyk, Vadym Solntsev, Svitlana Klymenko // EUREKA: physics and engineering. – 2023. – No. 5. – P. 67–79.  
<https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.003106>.
2. Ways of improvement of suborbital launch vehicles [Electronic resource] / Oleksii Kulyk, Mykola Dron, Vadym Solntsev, Svitlana Klymenko, Vladyslav Proroka, Vitaly Yemets // 72nd International Astronautical Congress. Technical programme IAC-21-D2,IP,4,x64134. Dubai, United Arab Emirates, 25–29 October 2021.
3. Perspectives for the use of new solutions in the creation of suborbital launch vehicles [Electronic resource] / Vladyslav Proroka, Mykola Dron, Oleksii Kulyk, Vadym Solntsev, Svitlana Klymenko, Olexandr Dobrodomov // 73rd International Astronautical Congress. Technical programme IAC-22-D2,IP,7,x69646. Paris, France, 18–22 September 2022.
4. Possibilities for expanding the application areas of suborbital launch vehicles [Electronic resource] Vladyslav Proroka, Mykola Dron, Oleksii Kulyk, Vadym Solntsev, Anatolii Abaturon, Alexandr Golubek, Olexandr Dobrodomov // 74nd International Astronautical Congress. Technical programme IAC-23-D2,IP,6,x77509. Baku, Azerbaijan, 2–6 October 2023.
5. Freeman II C. W. Solid rocket motor static fire test stand optimization: load cell effects and other uncertainties [Electronic resource]: Theses / Freeman II Charles W. – HUNTSVILLE, ALABAMA, 2018. – 78 p.  
URL: <https://www.proquest.com/openview/6ff576afbb47853f2241e31975cebe19/1?pq-origsite=gscholar&cbl=51922&diss=y>.
6. Lasinta Ari Nendra Wibawa. Static stress analysis and fatigue life prediction of rocket motor test stand using numerical simulation [Electronic resource] / Lasinta Ari Nendra Wibawa // R.E.M. (rekayasa energi manufaktur) jurnal. – 2021. – Vol. 6, no. 2. – P. 9–13.  
<https://doi.org/10.21070/r.e.m.v6i2.1533>.
7. Design of a lab-scale hybrid rocket test stand [Electronic resource] / James C. Thomas, Jacob M. Stahl, Gordon R. Morrow, Eric L. Petersen // 52nd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference, Salt Lake City, UT, 25–27 July 2016. URL: <https://arc.aiaa.org/doi/epdf/10.2514/6.2016-4965>.
8. Alves H. Wireless device to measure thrust and pressure in a rocket test bench / Henrique Alves, Alexandre Reis, Júlio Santos // International Congress of Engineering | Innovation and Sustainability Praxis, Covilhã, Castelo Branco, 1 November 2022.
9. McFarland. Small-Scale static fire tests of 3D printing hybrid rocket fuel grains produced from different materials [Electronic resource] / McFarland, Antunes // Aerospace. – 2019. – Vol. 6, no. 7. – P. 81. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/aerospace6070081>.
10. CZL 803 shearbeam loadcell | best loadcell dealer seegate loadcell [Electronic resource] // Seegate Loadcell. URL: <https://seegateloadcell.com/product/czl-803-shearbeam-loadcell/>.

11. BCT 22 Pressure Transmitter || ATEK || Made in Türkiye – ATEK Sensor Technologies Inc. [Electronic resource] // ATEK Sensör. URL: <https://ateksensor.com/en/product/bct-22-pressure-transmitter-atek-made-in-turkiye/>.

12. REX-Century series | RKC Instrument Inc. [Electronic resource] // RKC Instrument Inc. URL: <https://www.rkcinst.co.jp/english/products/4041/>.

Received 23.06.2024.

Accepted 27.06.2024

### ***Development of a stand for fire tests of rocket engines***

*Fire test stands are the main means of obtaining information about the operating parameters of rocket engines and the required degree of their reliability at the test stage. The main requirements for fire test stands are convenience and safety in their operation, a high level of accuracy of the obtained experimental data, low cost and availability of structural elements and hardware. The purpose of the work is the development of a universal stand designed for testing solid fuel rocket engines and liquid rocket engines with a thrust of up to 7000 N. These engines can be used as components of the propulsion system of suborbital launch vehicles of the ultralight and light class, as well as being booster units or accelerators of other types of aircraft. The design of the stand implemented by the "Rocketry agency" research team, which meets the stated requirements, is presented. Measures are proposed that, for the given design of the stand, made it possible to significantly reduce the negative impact of a number of factors on the accuracy of rocket engine thrust measurements.*

*Key words: stand of fire tests of rocket engines, suborbital rocket, development of objects of rocket and space technology, solid fuel rocket engines, liquid rocket engines, rocket accelerators of aircraft, accuracy of measurements, strain gauge, pressure in the combustion chamber.*

**Швець Артем Сергійович** – аспірант кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

**Пророка Владислав Аркадійович** – аспірант кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій, Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара.

**Добродомов Олександр Олександрович** - аспірант кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

**Кулик Олексій Володимирович** – кандидат технічних наук, доцент, кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

**Солнцеv Вадим Анатолійович** – науковий співробітник, Національний центр аерокосмічної освіти молоді імені О. М. Макарова.

**Shvets Artem** – PhD student, Department of Rocket Space and Innovative Technologies, Oles Gonchar Dnipro National University.

**Proroka Vladyslav** – PhD student, Department of Rocket Space and Innovative Technologies, Oles Gonchar Dnipro National University.

**Dobrodomov Oleksandr** – PhD student, Department of Rocket Space and Innovative Technologies, Oles Gonchar Dnipro National University.

**Kulyk Olexsii** – PhD, associate professor, Department of Rocket Space and Innovative Technologies, Oles Gonchar Dnipro National University.

**Solntsev Vadym** – researcher, O.M. Makarov National Youth Aerospace Education Center.

**ЗМІСТ**

**CONTENTS**

<b>Мороз Б. І., Круглик А. С., Мороз Д. М., Мартиненко А. А.</b> Математична модель і загальний алгоритм вирішення задачі обробки повідомлень з урахуванням їх цінності і старіння в системах літальних апаратів	3	<b>Moroz B.I., Kruhlyk A. S., Moroz D. M., Martynenko A. A.</b> Mathematical model and general algorithm for solving the problem of processing messages taking into account their value and aging in aircraft systems	3
<b>Антонюк В.А., Сидорова М.Г.</b> Інтеграція та використання штучного інтелекту для автоматизованого створення макросів	16	<b>Antonyuk V.A., Sydorova M.G.</b> Integration and use of artificial intelligence for automated macros creation	16
<b>Остапеч Я.Д.</b> Принципи побудови систем керування безпілотних транспортних засобів	24	<b>Ostapets Y.</b> Principles of construction of control systems for unmanned vehicles	24
<b>Макарченко В.С., Коротка Л.І.</b> Аналіз та підготовка даних при моделюванні плазмохімічних процесів отримання наносистем	30	<b>Makarchenko V.S., Korotka L.I.</b> Analysis and preparation of data during Modeling of plasma-chemical processes of obtaining nanosystems	30
<b>Макаров І.С., Ліхоузова Т.А.</b> Програмне забезпечення для аналізу текстової інформації з Telegram	40	<b>Makarov I.S., Likhouzova T.A.</b> Software for analyzing text infor- mation from Telegram	40
<b>Коновальчук А.В., Ліхоузова Т.А.</b> Аналіз сервісів для підтримки роботи бібліотеки	47	<b>Konovalchuk A.V., Likhouzova T.A.</b> Analysis of services to support library work	47
<b>Полтава В.В., Ліхоузова Т.А.</b> Аналіз шляхів автоматизації робочого процесу стоматологічної клініки	56	<b>Poltava V.V., Likhouzova T.A.</b> Analysis of ways to automate the dental clinic's workflow	56

<p><b>Кавац О.О., Кавац Ю.В., Гирка А.Д., Кібукевич Ю.О.</b> Аналіз інформаційної технології супутникового моніторингу розвитку сільськогосподарських культур із застосуванням нечіткої логіки</p>	64	<p><b>Kavats O.O., Kavats Y.V., Hyrka A.D., Kibukevych J.O.</b> Analysis of information technology of satellite monitoring of the development of agricultural crops using fuzzy logic</p>	64
<p><b>Островська К.Ю., Островський Є.В., Старик В.В.</b> Технологія створення цифрових двійників на основі ресурсів хмарної обчислювальної платформи</p>	73	<p><b>Ostrovska K.Yu., Ostrovsky E., Staryk V.</b> The technology of creating digital duplicates based on cloud computing platform resources</p>	73
<p><b>Ходанен Т.В., Лобода К.В.</b> Аналіз електромеханічних полів в околі вершини тріщини у п'єзоелектричному матеріалі</p>	82	<p><b>Khodanen T.V., Loboda K.V.</b> Analysis of electromechanical fields around the tip of a crack in a piezoelectric material</p>	82
<p><b>Бондар О., Ніколенко А., Коваленко В., Китаєв О., Степаненко О., Сіверський С., Сприса В.</b> Принципи розробки еквівалентних кіл з нелінійними електрохімічними елементами: аналіз та експеримента- льне визначення параметрів</p>	91	<p><b>Bondar O., Nikolenko A., Kovalenko V., Kitaev O., Stepanenko O., Siversky S., Sprysa V.</b> Principles of constructing equivalent circuits for nonlinear electrochemical elements: analysis and experimental parameter determination</p>	91
<p><b>Охримчук Д.Д., Ємел'яненко Т.Г.</b> Розроблення програмного з абезпечення для автоматизації розрахунків під час аналізу гідрогеохімічних даних</p>	109	<p><b>Okhrimchuk D.D., Yemelianenko T.G.</b> Development of software for automating calculations during the analysis of hydrogeochemical data</p>	109
<p><b>Павлюк Д.І., Байбуз О.Г.</b> Огляд методів семантичної класифікації тексту</p>	120	<p><b>Pavliuk D , Baibuz O.</b> Review of methods for semantic text classification</p>	120

<b>Песчанський В.Ю., Сулема Є.С.</b> Метод синхронізації темпоральних мультимодальних даних для створення цифрового двійника гортані	137	<b>Peschanskii V., Sulema Y.</b> Methods of creating digital twins of medico-biological objects using otolaryngology as an example	137
<b>Гук Н.А., Мітіков М.Ю.</b> Сучасні проблеми ідентифікації аномалій в роботі Enterprise Systems	146	<b>Guk N., Mitikov N.</b> Modern problems of anomaly identification in Enterprise Systems	146
<b>Сопов О.О., Жаріков Е.В.</b> Підхід до міграцій у задачі розміщення контейнерів	154	<b>Sopov O., Zharikov E.</b> An approach to migrations in the container placement task	154
<b>Трофименко О.Г., Соколов А.В., Логінова Н. І., Ахмаметьєва Г.В., Чикунів П. О.</b> Штучний інтелект у сфері військової логістики	164	<b>Sokolov A., Trofymenko O., Loginova N., Chykunov P., Akhmametieva H.</b> Artificial intelligence applications in military logistic	164
<b>Харун В.Р., Рачкевич Р.В.</b> Порівняльна оцінка технічних характеристик виконавчих механізмів приводів свердловинних штангових насосних установок	172	<b>Kharun V., Rachkevych R.</b> Comparative assessment of the technical characteristics of executive mechanisms in well rod pumping unit drives	172
<b>Швець А.С., Пророка В.А., Добродомов О.О., Кулик О.В., Солнцев В.А.</b> Розробка стенду вогневих випробувань ракетних двигунів	181	<b>Shvets A., Proroka V., Dobrodomov O., Kulyk O., Solntsev V.</b> Development of a stand for fire tests of rocket engines	181

РЕФЕРАТИ

УДК 004.42:519.85

Мороз Б. І., Круглик А. С., Мороз Д. М., Мартиненко А. А. **Математична модель і загальний алгоритм вирішення задачі обробки повідомлень з урахуванням їх цінності і старіння в системах літальних апаратів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.3 – 15.

У роботі розглядається загальний алгоритм обробки інформаційних потоків, в залежності від визначеної цінності окремих повідомлень в межах однакових часових проміжків. Така модель має перспективи в структурі ЗС України, особливо в умовах ведення активних бойових дій, де існує дуже динамічне середовище. Розглянуто існуюче технічне рішення для раціонального розбивання алгоритму на модулі, що дозволить розпаралелити процес розробки ПЗ, а також забезпечить гнучкість і адаптованість системи до появи інноваційних технічних рішень.

Бібл. 15, іл. 2.

УДК 004.8

Антонюк В.А., Сидорова М.Г. **Інтеграція та використання штучного інтелекту для автоматизованого створення макросів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.16 – 23.

Метою цієї роботи є дослідити поєднання систем автоматизації та ШІ та їх вплив на оптимізацію робочих процесів, провести огляд існуючих рішень, визначити ключові фактори, які впливають на успішне поєднання систем автоматизації та ШІ, запропонувати технологію інтеграції та навчання великої мовної моделі для автоматизованого створення макросів у системі автоматизації процесів, реалізувати практичну апробацію запропонованої технології у системі “Draw & GO”, розробити рекомендації щодо ефективного використання систем автоматизації та ШІ для оптимізації робочих процесів.

Бібл. 11, іл. 2

УДК 004.93, 004.3

Остапеч Я.Д. **Принципи побудови систем керування безпілотних транспортних засобів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.24 – 29.

Розглядаються принципи побудови та організація системи керування безпілотних транспортних засобів. Запропоновано класифікацію засобів сенсорного сканування. Розроблено узагальнену структуру системи керування, описано її окремі функціональні підсистеми. Описано основні апаратні компоненти системи. Представлена архітектура може бути використана при створенні безпілотних транспортних засобів.

Бібл. 5, іл. 3.

УДК 004.4: 004.94

Макарченко В.С., Коротка Л.І. **Аналіз та підготовка даних при моделюванні плазмомімічних процесів отримання наносистем** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.30 – 39.

Проводиться аналіз щодо підготовки експериментальних даних для побудови матема-

тичних моделей плазмохімічних процесів отримання наносистем. Оглянуто два класи математичних моделей, зроблено аналіз їх якості та подальшого застосування. Пропонується використовувати мульти векторну регресію, оскільки такий підхід має здатність ефективно працювати з невеликими вибірками даних, використовує опорні вектори для моделювання регресійного коридору і, як наслідок, дозволяє моделювати складні нелінійні залежності.

Бібл. 15, рис. 3.

УДК 004.91

Макаров І. С., Ліхоузова Т. А. **Програмне забезпечення для аналізу текстової інформації з Telegram** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.40 – 46.

Розглянуто системи агрегації та класифікації текстової інформації, які використовуються для обробки даних з різноманітних джерел, зокрема з телеграм-каналів. Найбільш активною сферою досліджень є використання моделей машинного навчання для аналізу тексту, що відкриває нові можливості для підвищення ефективності обробки даних. Запропоновано програмне забезпечення – вебзастосунок для аналізу текстової інформації з Telegram. Застосунок підтримує обмежений набір вбудованих моделей машинного навчання, оптимізованих для різних завдань класифікації текстових даних, пропонуючи при цьому можливість користувачам інтегрувати власні моделі згідно з їхніми унікальними потребами.

Бібл. 7, іл. 3, табл. 1.

УДК 004.91

Коновальчук А. В., Ліхоузова Т. А. **Аналіз сервісів для підтримки роботи бібліотеки** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.47 – 55.

Розглянуто сервіси для підтримки роботи бібліотеки. Щоб зробити бібліотечні книги більш привабливими для читачів, спершу потрібно полегшити пошук та ознайомлення з ними. Проте більшість бібліотек не мають сучасних електронних ресурсів, а їх каталоги застарілі та малофункціональні. Щоб зберегти свою роль у цифрову добу, бібліотекам потрібно оновлюватися, пропонувати зручні електронні каталоги та інші онлайн-сервіси, щоб краще відповідати потребам сучасних читачів та стандарту в інших сферах послуг.

Метою дослідження є оновити бібліотечні сервіси для кращої взаємодії з читачами: спростити каталоги, запропонувати зручний пошук, рекомендації, позначки книг та онлайн-повернення. Запропоновано перелік вимог до програмного забезпечення для підтримки роботи бібліотеки.

Бібл. 8, іл. 9, табл. 1.

УДК 004.91

Полтава В. В., Ліхоузова Т. А. **Аналіз шляхів автоматизації робочого процесу стоматологічної клініки** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.56 – 63.

Розглянуто системи управління робочим процесом стоматологічних клінік. Мета дослідження – пошук можливостей автоматизувати основні процеси роботи стоматологічної клініки, підвищити ефективність роботи лікарів-стоматологів та забезпечити зручне надання

послуг клієнтам. З огляду на вже існуючі продукти та їх функціонал, запропоновано покращити систему нагадувань та рекомендацій таких програм. Це може включати нагадування про найближчий візит, скасування візиту, привітання із святами, рекомендації після візиту відповідно до проведеної процедури тощо. Особистий кабінет для пацієнтів також є актуальною функцією, щоб забезпечити їм зручний доступ до їх медичної історії в будь-який час та момент. Запропоновано перелік вимог до програмного забезпечення для автоматизації роботи стоматологічної клініки.

Бібл. 5, іл. 6, табл. 1.

УДК 528.88:630

Кавац О.О., Кавац Ю.В., Гирка А.Д., Кібукевич Ю.О. **Аналіз інформаційної технології супутникового моніторингу розвитку сільськогосподарських культур із застосуванням нечіткої логіки** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.64 – 72.

Зміни клімату все більше впливають на аграрне виробництво європейських країн, сучасні методи супутникових даних пропонують практичні рішення для моніторингу стану розвитку сільськогосподарських культур із подальшим прогнозуванням їх урожайності. Рослинництво, яке значною мірою залежить від природних ресурсів і погодних умов, постійно стикається з такими небезпечними явищами, як різкі перепади температур повітря та режиму вологозабезпечення впродовж вегетаційного періоду, які напряду впливають на продуктивність культур. В статті досліджено вплив гідротермічних умов на стан розвитку сільськогосподарських рослин із застосуванням супутникового моніторингу. Дані зі супутників Landsat-8, Sentinel-1 та Sentinel-2 дозволяють виявляти особливості розвитку рослин у посівах та загрози формуванню продуктивності культур. Дослідження підтвердили, що застосування нечіткої логіки допомагає у плануванні та оптимізації виробництва сільськогосподарських культур в умовах зміни клімату.

Бібл. 9, рис. 5.

УДК 004.942

Островська К.Ю., Островський Є.В., Старик В.В. **Технологія створення цифрових двійників на основі ресурсів хмарної обчислювальної платформи** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.73 – 81.

В результаті роботи було розроблено технологію створення цифрових двійників, а також створено прототип цифрового двійника на основі ресурсів хмарної обчислювальної платформи Microsoft Azure. Також було розроблено клієнтську програму для роботи з цифровим двійником. У ході розробки було вирішено такі завдання: проведено огляд наукової літератури та існуючих рішень Інтернету речей для створення цифрових двійників; вивчено технології, що надаються хмарними обчислювальними платформами для створення цифрових двійників; спроектовано та розроблено прототип цифрового двійника на основі хмарних обчислювальних ресурсів обчислювальної платформи Microsoft Azure; здійснено тестування розробленого прототипу.

Бібл. 11, іл. 5, табл. 2.

УДК 539.3

Ходанен Т.В., Лобода К.В. **Аналіз електромеханічних полів в околі вершини тріщини у п'єзоелектричному матеріалі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.82 – 90.

Розглянуто задачу плоскої деформації для тунельної тріщини у п'єзоелектричному тілі прямокутного перерізу. На границі задані система рівномірно розподілених напружень та електричної індукції. Методами теорії комплексних потенціалів побудовано аналітичні вирази для електромеханічних полів у будь-якій точці перерізу. Побудовано алгоритм розв'язку також методом скінченних елементів. Для випадку, коли розмір тріщини набагато менший за розмір тіла проведено порівняння одержаних результатів і встановлено їх хорошу узгодженість.

Бібл. 12, іл. 1, табл. 3.

УДК 621.314

Бондар О., Ніколенко А., Коваленко В., Китаєв О., Степаненко О., Сіверський С., Сприца В. **Принципи розробки еквівалентних кіл з нелінійними електрохімічними елементами: аналіз та експериментальне визначення параметрів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.91 – 108.

В роботі запропоновано узагальнену схему заміщення електролізера осадження металевих покриттів. У якості нелінійних елементів зазначеної схеми розглядаються залежності часткових струмів розчинення та осадження металу від прианодного або прикатодного спаду напруги відповідно. Також проаналізовано можливість застосування певних спрощень у загальній схемі в залежності від особливостей процесу осадження того чи іншого металу.

Одночасно запропоновано загальну структуру апроксимуючих виразів та визначено коефіцієнти апроксимації для окремих нелінійних електрохімічних елементів. Зазначені вирази відрізняються від раніше відомих тим, що їх структура є придатною для отримання загальних закономірностей електромагнітних процесів, які мають місце в системах імпульсного електроосадження металів у явному вигляді.

Бібл. 14.

УДК 004.45

Охримчук Д.Д., Ємел'яненко Т.Г. **Розроблення програмного забезпечення для автоматизації розрахунків під час аналізу гідрогеохімічних даних** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.109 – 119.

У статті описано розробку програмного застосунку для автоматизації розрахунків гідрогеохімічних даних та формування звітів. Основна мета дослідження полягає в підвищенні ефективності обробки даних отриманих під час гідрогеохімічного моніторингу за допомогою технологій C# та MySQL. Система дозволяє структуровано зберігати дані, що сприяє зменшенню помилок та підвищенню точності результатів. Також дозволяє формувати звітність на основі результатів вимірювань. Розглянуто основні компоненти застосунку, та його модульну структуру.

Бібл. 5, іл. 5.

УДК 004.912:519.25

Павлюк Д.І., Байбуз О.Г. **Огляд методів семантичної класифікації тексту** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.120 – 136.

У статті проведено аналіз методів класифікації тексту, таких як наївний байєс, логістична регресія, метод опорних векторів (SVM) з акцентом на сучасні методи глибокого навчання, включаючи штучні нейронні мережі (ANN), згорткові нейронні мережі (CNN), рекурентні нейронні мережі (RNN) та трансформери. Для оцінки використовується датасет відгуків про фільми IMDb. Дослідження порівнює ефективність цих методів у класифікації тексту за тональністю, враховуючи точність та обчислювальні ресурси. Мета роботи - визначити найкращий підхід для автоматизованої класифікації тексту та надати рекомендації для подальших досліджень.

Бібл. 13.

УДК 004.4 : 004.94

Песчанський В.Ю., Сулема Є.С. **Метод синхронізації темпоральних мультимодальних даних для створення цифрового двійника гортані** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.137 – 145.

У статті запропоновано метод синхронізації темпоральних мультимодальних даних, який призначено для створення та оптимізацію цифрових двійників гортані людини. Метод надає можливість інтеграції діагностичних даних відеоларингостробоскопії та акустичного аналізу голосу для створення точної 3D-моделі гортані, яка відтворює фізіологічні характеристики та голосову функцію пацієнта. У статті описано метод, заснований на глибокому навчанні, який забезпечує точне вирівнювання часових маркерів фаз голосоутворення на всіх типах даних, відображаючи деталізовану біомеханіку гортані в динаміці. Результати дослідження свідчать про підвищення точності цифрового двійника. Застосування цифрового двійника гортані покликане спростити планування хірургічних втручань та інших лікувальних заходів.

Бібл. 11.

УДК 004.6:004.4:004.942

Гук Н.А., Мітіков М.Ю. **Сучасні проблеми ідентифікації аномалій в роботі Enterprise Systems** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.146 – 153.

У даній статті розглядаються сучасні проблеми ідентифікації аномалій у роботі корпоративних систем за допомогою аналізу знімків пам'яті, аналізуються методи та інструменти, що використовуються для цього завдання, та обговорюються можливі напрями їх подальшого розвитку.

Бібл. 9.

УДК 004.4, 94

Сопов О.О., Жаріков Е.В. **Підхід до міграцій у задачі розміщення контейнерів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.154 – 163.

У цій статті досліджено ключову роль міграції у процесі розміщення контейнерів у

хмарних центрах обробки даних. Дослідження підкреслює необхідність алгоритмів міграції для ефективного управління розподілом контейнерів та віртуальних машин, уникаючи перевантаження чи недостатнього використання ресурсів. Розроблено гібридний алгоритм міграції, для оптимізації ефективності віртуальних машин та фізичних серверів. Експерименти показали, що розроблений підхід знижує операційні витрати на 24% та зменшує порушення SLA на 40% у порівнянні з підходом, коли міграції не використовуються.

Бібл. 14, іл. 3, табл. 0.

УДК 004.056

Трофименко О.Г., Соколов А.В., Логінова Н. І., Ахмаметьєва Г.В., Чикунів П. О. **Штучний інтелект у сфері військової логістики** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.164 – 171.

Стаття присвячена дослідженню ролі ШІ в сучасному трансформаційному розвитку військової логістики, а також аналізу сфер можливого застосування ШІ в цій галузі, оскільки глобальні військові стратегії все більше залежать від надійності та гнучкості ланцюга поставок. системи. Проведений аналіз показав, що інтеграція алгоритмів ШІ допомагає не тільки оптимізувати процеси, але й підвищити безпеку даних і ресурсів, а також активізувати дослідження в області оптимізації логістики.

Бібл. 13.

УДК 622.276.53.054

Харун В.Р., Рачкевич Р.В. **Порівняльна оцінка технічних характеристик виконавчих механізмів приводів свердловинних штангових насосних установок** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.172 – 180.

В науковій праці авторами розроблено методику вибору необхідних параметрів. Визначено, що для порівняння технічних параметрів приводів СШНУ, як традиційних (балансирних) приводів так і нових конструкцій, необхідно провести розрахунки передаточних функцій виконавчого механізму та крутного моменту його кривошипного вала.

Бібл. 16.

УДК 621.45.018.2

Швець А.С., Пророка В.А., Добродомов О.О., Кулик О.В., Солнцев В.А. **Розробка стенду вогневих випробувань ракетних двигунів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 5(154). – Дніпро, 2024. – С.181 – 193.

У роботі представлено конструкцію стенду, реалізовану дослідницькою командою “Rocketry agency”, що відповідає заявленим вимогам. Запропоновано заходи, які для поданої конструкції стенду дозволили суттєво знизити негативний вплив ряду факторів на точність вимірювань тяги ракетних двигунів.

Бібл. 12.

UDC 004.42:519.85

Moroz B.I., Kruhlyk A. S., Moroz D. M., Martynenko A. A. **Mathematical model and general algorithm for solving the problem of processing messages taking into account their value and aging in aircraft systems** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.3 – 15.

The paper discusses a general algorithm for processing information streams, depending on the defined value of individual messages within identical time intervals. Such a model holds promise in the structure of the Armed Forces of Ukraine, especially in conditions of active combat operations, where the situation is highly dynamic. An existing technical solution for rationalizing the algorithm into modules is considered, which will allow for the parallelization of software development processes and ensure the flexibility and adaptability of the system if innovative technical solutions appear.

Bibl. 15, ill. 2.

UDK 004.8

Antonyuk V.A., Sydorova M.G. **Integration and use of artificial intelligence for automated macros creation** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.16 – 23.

The purpose of this work is to investigate the combination of automation systems and AI and their impact on the optimization of work processes, to review existing solutions, to determine the key factors that affect the successful combination of automation systems and AI, to propose a technology for the integration and training of a large language model for the automated creation of macros in process automation system, implement a practical approbation of the proposed technology in the "Draw & GO" system, develop recommendations for the effective use of automation systems and AI to optimize work processes.

Ref. 11, ill. 2.

UDC 004.93, 004.3

Ostapets Y. **Principles of construction of control systems for unmanned vehicles** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.24 – 29.

The principles of construction and organization of the control system of unmanned vehicles are considered. A classification of sensor scanning tools is proposed. The generalized structure of the control system is developed, its separate functional subsystems are described. The main hardware components of the system are described. The presented architecture can be used in the creation of unmanned vehicles.

Bible 5, fig. 3.

UDC 004.4: 004.94

Makarchenko V.S., Korotka L.I. **Analysis and preparation of data during Modeling of plasma-chemical processes of obtaining nanosystems** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.30 – 39.

An analysis is carried out regarding the preparation of experimental data for the construction of mathematical models of plasma-chemical processes of obtaining nanosystems. Two classes of mathematical models were reviewed, and their quality and further application were analyzed. It is proposed to use multi-vector regression since this approach can work effectively with small data samples, uses support vectors to model the regression corridor, and, as a result, allows the modeling of complex nonlinear dependencies.

Bibl. 15, Fig. 3.

UDC 004.91

Makarov I. S., Likhouzova T. A. **Software for analyzing text information from Telegram** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.40 – 46.

The systems of aggregation and classification of textual information, which are used to process data from various sources, in particular from telegram channels, are considered. The most active field of research is the use of machine learning models for text analysis, which opens up new opportunities for increasing the efficiency of data processing. Software is offered - a web application for analyzing text information from Telegram. The application supports a limited set of built-in machine learning models optimized for different text data classification tasks, while offering users the ability to integrate their own models according to their unique needs.

Bible 7, fig. 3, tab. 1.

UDC 004.91

Konovalchuk A.V., Likhouzova T.A. **Analysis of services to support library work** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.47 – 55.

The services to support the work of the library are considered. To make library books more attractive to readers, you first need to make them easier to find and read. However, most libraries do not have modern electronic resources, and their catalogs are outdated and poorly functional. To maintain their role in the digital age, libraries need to update themselves, offer convenient electronic catalogs and other online services to better meet the needs of modern readers and the standard in other areas of services.

The goal of the study is to update library services for better interaction with readers: simplify catalogs, offer convenient search, recommendations, bookmarks and online returns. A list of software requirements to support library work is proposed.

Bible 8, fig. 9, tab. 1.

UDC 004.91

Poltava V.V., Likhouzova T.A. **Analysis of ways to automate the dental clinic's workflow** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.56 – 63.

Workflow management systems of dental clinics are considered. The purpose of the research is to find opportunities to automate the main processes of the dental clinic, to increase the efficiency of the work of dentists and to provide convenient services to clients. Considering the already existing products and their functionality, it is proposed to improve the system of reminders and recommendations of such programs. This may include reminders about the next visit, cancellation of the visit, greetings with holidays, recommendations after the visit according to the procedure carried out, etc. A personal account for patients is also a relevant feature to provide them with convenient access to their medical history at any time and moment. A list of requirements for software for automating the work of a dental clinic is offered.

Bibl. 5, fig. 6, tab. 1.

UDK 528.88:630

Kavats O.O., Kavats Y.V., Hyrka A.D., Kibukevych J.O. **Analysis of information technology of satellite monitoring of the development of agricultural crops using fuzzy logic** // System

technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.64 – 72.

Climate change is increasingly affecting agricultural production in European countries, and modern satellite data methods offer practical solutions for monitoring the development of crops and subsequently predicting their yields. Crop production, which is largely dependent on natural resources and weather conditions, constantly faces such dangerous phenomena as sharp changes in air temperature and moisture regime during the growing season, which directly affect crop productivity. The article investigates the impact of hydrothermal conditions on the development of agricultural plants using satellite monitoring. Data from Landsat-8, Sentinel-1, and Sentinel-2 satellites allow us to identify the peculiarities of plant development in crops and threats to crop productivity. Studies have confirmed that the use of fuzzy logic helps in planning and optimizing crop production in the face of climate change.

Bibl. 10.

UDC 004.942

Ostrowska K.Yu., Ostrovsky E., Staryk V. **The technology of creating digital duplicates based on cloud computing platform resources** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.73 – 81.

As a result of the work, a technology for creating digital doubles was developed, and a prototype of a digital double was created based on the resources of the Microsoft Azure cloud computing platform. A client program for working with a digital double was also developed. In the course of development, the following tasks were solved: a review of scientific literature and existing Internet of Things solutions for creating digital duplicates was conducted; technologies provided by cloud computing platforms for creating digital doubles were studied; designed and developed a digital double prototype based on the cloud computing resources of the Microsoft Azure computing platform; the developed prototype was tested.

Bible 11, fig. 5, tab. 2.

UDC 539.3

Khodanenko T.V., Loboda K.V. **Analysis of electromechanical fields around the tip of a crack in a piezoelectric material** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.82 – 90.

The problem of plane deformation for a tunnel crack in a piezoelectric body of rectangular cross-section is considered. At the boundary, a system of uniformly distributed stresses and electrical induction are prescribed. Analytical expressions for electromechanical fields at any point were found by means of the complex potentials method. The solution algorithm was also developed using the finite element method. For the case of the crack size is much smaller than the size of the body, the obtained results were compared and their good agreement was established.

Bible 12, ill. 1, tab. 3.

UDC 621.314

Bondar O., Nikolenko A., Kovalenko V., Kitaev O., Stepanenko O., Siversky S., Sprysa V. **Principles of constructing equivalent circuits for nonlinear electrochemical elements: analysis and experimental parameter determination** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.91 – 108.

The paper proposes a generalized scheme for replacing the electrolyzer for the deposition of metal coatings. As nonlinear elements of the specified scheme, the dependences of the partial

currents of metal dissolution and deposition on the near-anode or near-cathode voltage drop are considered, respectively. The possibility of applying certain simplifications in the general scheme, depending on the peculiarities of the deposition process of one or another metal, was also analyzed.

At the same time, the general structure of approximating expressions is proposed and the approximation coefficients for individual nonlinear electrochemical elements are determined. The specified expressions differ from the previously known ones in that their structure is suitable for obtaining the general regularities of electromagnetic processes that take place in systems of pulse electrodeposition of metals in an explicit form.

Bible 14.

UDC 004.45

Okhrimchuk D.D., Yemelienenko T.G. **Development of software for automating calculations during the analysis of hydrogeochemical data** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.109 – 119.

The article describes the development of a software application for automating calculations of hydrogeochemical data and generating reports. The main goal of the research is to improve the efficiency of processing data obtained during hydrogeochemical monitoring using C# and MySQL technologies. The system allows for structured data storage, which reduces errors and increases the accuracy of results. It also enables the generation of reports based on measurement results. The main components of the application and its modular structure are discussed.

Refs. 5, figs. 5.

UDC 004.912:519.25

Pavliuk D , Baibuz O. **Review of methods for semantic text classification** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.120 – 136.

Recent advancements in text classification have focused on the application of machine learning and deep learning techniques. Traditional methods such as Naive Bayes, Logistic Regression, and Support Vector Machines (SVM) have been widely utilized due to their efficiency and simplicity. However, the advent of deep learning has introduced more complex models like Artificial Neural Networks (ANN), Convolutional Neural Networks (CNN), and Recurrent Neural Networks (RNN), which can automatically extract features and detect intricate patterns in textual data. Additionally, transformer-based models such as BERT have set new benchmarks in text classification tasks. Despite their high accuracy, these models require substantial computational resources and are not always practical for every application. The ongoing research aims to balance accuracy and computational efficiency.

Refs. 13.

UDC 004.4:004.94

Peschanskii V., Sulema Y. **Methods of creating digital twins of medico-biological objects using otolaryngology as an example** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.137 – 145.

The paper presents an in-depth analysis on the most suitable tools and techniques for the formulation of a digital twin, specifically focusing on internal organs. The larynx, a pivotal organ in the human respiratory and vocal systems, is highlighted as the primary case

study. The basis of this digital twin generation is the video stream sourced directly from a medical device's onboard camera, which provides real-time visual data of the organ.

Refs. 11.

UDC 004.6:004.4:004.942

Guk N., Mitikov N. **Modern problems of anomaly identification in Enterprise Systems** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.146 – 153.

This article discusses the current problems of identifying anomalies in corporate systems by analysing memory snapshots, analyses the methods and tools used for this task, and discusses possible directions for their further development.

Refs. 9.

UDC 004.4, 94

Sopov O., Zharikov E. **An approach to migrations in the container placement task** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.154 – 163.

This article examines the critical role of migration in the process of container placement within cloud data centers. The research highlights the need for migration algorithms to effectively manage the distribution of containers and virtual machines, avoiding overloading or underutilization of resources. A hybrid migration algorithm was developed to optimize the efficiency of virtual machines and physical servers. Experiments have shown that the developed approach reduces operational costs by 24% and decreases SLA violations by 40% compared to approaches where migrations are not used.

Ref. 14, pic. 3, tab. 0.

UDC 004.056

Sokolov A., Trofymenko O., Loginova N., Chykunov P., Akhmametiyeva H. **Artificial intelligence applications in military logistic** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.164 – 171.

The paper is devoted to the research of the role of AI in the modern transformational development of military logistics as well as analysis of the areas of possible application of AI in this branch, as global military strategies increasingly depend on the reliability and flexibility of supply chain systems. The analysis performed showed that the integration of AI algorithms helps not only to optimize processes, but also to increase the security of data and resources, as well as to intensify research in the field of logistics optimization.

Bible 13.

UDC 622.276.53.054

Kharun V., Rachkevych R. **Comparative assessment of the technical characteristics of executive mechanisms in well rod pumping unit drives** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.172 – 180.

The authors have developed a methodology for selecting the necessary parameters in this research. It has been determined that to compare the technical parameters of SRPU, both traditional (beam) drives and new designs, it is necessary to calculate the transfer functions of the executive mechanism and the torque of its crankshaft.

Bible 16.

UDC 621.45.018.2

Shvets A., Proroka V., Dobrodomov O., Kulyk O., Solntsev V. **Development of a stand for fire tests of rocket engines** // System technologies. N 5(154) - Dnipro, 2024.- P.181 – 193.

The work presents the design of the stand, implemented by the "Rocketry agency" research team, which meets the stated requirements. Measures are proposed that, for the presented design of the stand, made it possible to significantly reduce the negative impact of a number of factors on the accuracy of rocket engine thrust measurements.

Bible 12.