

Міністерство освіти і науки України

---

---

# Системні технології

System technologies

---

4 (165) 2026

---

*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 4 (165). - Дніпро, 2026. – 251 с.  
ISSN 1562-9945 (Print).  
ISSN 2707-7977 (Online).

### Редакційна колегія випуску:

**Редчиць Д.О.** - д.т.н., проф. (відп. редактор)  
**Svyetlichnyy D.**(Poland) - Ph.D, Professor, Full Professor  
**Островська К.Ю.** – к.т.н., доц.

Прогресивні інформаційні  
технології та організація  
сучасного виробництва

**Гвоздева І.М.** - д.т.н., проф.  
**Гнатушенко Вік.В.** - д.т.н., проф.  
**Шинкаренко В.І.** - д.т.н., проф. (відп. редактор)  
**Shults Roman** (Kingdom of Saudi Arabia) - DSc, PhD,  
Associate Professor

Математичне  
та програмне забезпечення  
інтелектуальних систем

**Бердник М.Г.** - д.т.н., проф.  
**Гнатушенко В.В.** - д.т.н., проф., (відп. редактор)  
**Heipke Christian** (Germany) - Dr.-Ing., Professor

Системні технології  
обробки інформації та  
кібербезпека

Збірник друкується за рішенням Вченої Ради  
Українського державного університету науки і технологій  
від 28.01.2026 р., № 6

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

© Український державний університет науки і технологій,  
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,  
ІВК «Системні технології», 2026

Б.Г. Кісельов, А.О. Сенько, А.І. Купін, Д.К. Балик

## ЕМПІРИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ МІНІМАЛЬНО ДОСТАТНЬОГО ОБСЯГУ НАВЧАЛЬНОЇ ВИБІРКИ ДЛЯ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ ЗА ЗАДАНОГО РІВНЯ ПОХИБКИ

*Анотація.* Статтю присвячено задачі емпіричного визначення мінімально достатнього обсягу навчальної вибірки для регресійних моделей машинного навчання у системах сенсорного сортування руд. Актуальність теми зумовлена значними витратами на формування репрезентативних наборів даних у гірничодобувній промисловості. Постановка проблеми полягає в необхідності переходу від якісного аналізу кривої навчання до кількісної оцінки достатнього розміру вибірки за заданого рівня похибки. Метою дослідження є перевірка ієрархії підходів: крива навчання – параметрична степенева екстраполяція – GP-based learning-type curve. Методи: 10-fold GroupKFold крос-валідація, байєсівський підбір гіперпараметрів (Optuna), нелінійна регресія, гауссівські процеси. Отримано:  $R^2 = 0,93$  на тестових фолдах; мінімально достатній обсяг вибірки для  $RMSE \leq 12$  оцінено в діапазоні 559–810 спостережень. Ключовий висновок: запропонована методика дозволяє обґрунтовано визначати поріг, після якого подальше розширення вибірки перестає давати практичний ефект.

*Ключові слова:* машинне навчання; крива навчання; мінімальний обсяг вибірки; степенева апроксимація; гауссівський процес; сортування руд; крос-валідація; HistGradientBoosting; Neural Scaling Laws; екстраполяція.

**Постановка проблеми.** У задачах машинного навчання не існує універсальної відповіді на питання про те, яким має бути достатній обсяг навчальної вибірки для досягнення належної якості моделі. Необхідний розмір вибірки визначається не лише видом моделі, а й складністю задачі, структурою даних, співвідношенням між корисним сигналом і шумом, вибраною метрикою якості, а також наявністю неусувної похибки. У прикладних умовах проблема додатково ускладнюється тим, що формування нових даних, їх підготовка, верифікація та подальший аналіз потребують значних часових, фінансових і організаційних витрат. З цієї причини питання визначення достатнього обсягу навчальної вибірки має не лише теоретичне, а й безпосереднє практичне значення.

Для задачі сортування руд ця проблема є особливо актуальною. Формування репрезентативної навчальної вибірки пов'язане з необхідністю отримання значної кількості спостережень для різних типів матеріалу, проведення супровідних лабораторних та інструментальних досліджень, а також використання спеціалізованих засобів вимірювання. До складу таких даних можуть входити: результати хімічного аналізу,

магнітні характеристики, геометричні параметри, температурні показники сенсорів та інші спостережувані величини. Саме тому в цій предметній області недостатньо виходити з формального припущення, що збільшення кількості даних завжди є безумовно корисним: необхідно обґрунтовано визначити, на якому етапі подальше нарощування вибірки перестає давати суттєвий практичний ефект.

Недостатній обсяг навчальної вибірки може призводити до нестійкого навчання, підвищеної варіативності результатів та погіршення узагальнювальної здатності моделі навіть у тих випадках, коли сам клас моделей є загалом придатним до поставленої задачі. Разом із тим просте збільшення кількості спостережень не гарантує пропорційного покращення якості. Якщо основне обмеження пов'язане з неусувною похибкою, шумом вимірювань або слабкою інформативністю ознак, то додаткові приклади можуть забезпечувати лише незначний вигравш. Отже, практичний інтерес становить визначення мінімально достатнього розміру вибірки за заданого рівня похибки або за критерієм малопомітного приросту якості при подальшому розширенні даних [1].

У зв'язку з цим виникає потреба в підході, який би дозволяв на основі вже наявної, відносно невеликої вибірки емпірично оцінити, як змінюється похибка моделі зі зростанням кількості навчальних прикладів, і на цій основі прогнозувати доцільність подальшого розширення набору даних. Такий підхід має бути орієнтований не лише на констатацію поточного рівня якості, а й на виявлення тієї межі, після якої приріст ефективності стає малопомітним. Саме така постановка є найбільш релевантною для прикладних систем сортування руд, у яких вартість отримання додаткових спостережень є суттєвою, а рішення щодо необхідності розширення вибірки повинно бути методично обґрунтованим, а не інтуїтивним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для дослідження залежності якості моделі від обсягу навчальної вибірки традиційно використовують криві навчання (learning curves). Комплексний огляд форм кривих навчання та методів їх аналізу представлено у роботі [2], де показано, що для більшості прикладних задач спадання похибки зі збільшенням  $N$  задовільно описується степеневою залежністю.

Питання практичного планування розміру вибірки для задач класифікації та прогнозування досліджувалось у ряді робіт. Figueroa et al. [3] запропонували методику екстраполяції кривих навчання для бінарної класифікації медичних даних. Beleites et al. [4] провели систематичне дослідження залежності між розміром вибірки та якістю класифікатора у хімічній аналітиці. Vabalas et al. [5] проаналізували вплив обмеженого розміру вибірки на достовірність оцінок якості моделей машинного навчання та показали небезпеку завищення якості при недостатній кількості даних.

Сучасним розвитком параметричної екстраполяції є GP-based learning-type curves, у яких детермінований скелет (степенева функція) доповнюється гауссівським процесом. Такий підхід дозволяє не лише оцінити центральну траєкторію зміни похибки, а й кількісно охарактеризувати невизначеність прогнозу при виході за межі наявного діапазону обсягів вибірки [6].

Важливим теоретичним підґрунтям є концепція Neural Scaling Laws [7], згідно з якою похибка нейромережових моделей змінюється зі зростанням обсягу даних за гладкою степеневою залежністю. У межах даної роботи ця концепція використовується не для прямого перенесення висновків, а для обґрунтування гіпотези про наявність степеневої масштабної закономірності у задачі сортування руд.

Слід відзначити, що сучасні методи автоматичного підбору гіперпараметрів [8] суттєво спрощують процес оптимізації моделі та дозволяють зосередити дослідницькі зусилля на аналізі поведінки якості залежно від обсягу даних. Алгоритм HistGradientBoosting [9], використаний у даному дослідженні, демонструє стабільну поведінку на різних обсягах вибірки завдяки вбудованій регуляризації та нативній обробці пропущених значень.

Разом із тим застосування зазначених підходів безпосередньо до задачі сортування руд на основі сенсорних даних у наявній літературі не розглядалось. Це визначає актуальність та наукову новизну даного дослідження.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є розробка та практична перевірка методики емпіричного визначення мінімально достатнього обсягу навчальної вибірки для регресійних моделей машинного навчання у задачі сенсорного сортування руд.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

- формування та попередня обробка навчального набору реальних сенсорних даних;
- навчання та оцінювання моделі в умовах групової крос-валідації;
- побудова кривої навчання та параметрична степенева екстраполяція;
- застосування GP-based learning-type curve для статистичного оцінювання невизначеності прогнозу;
- формулювання кількісних рекомендацій щодо достатнього обсягу вибірки.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Дослідження базується на реальних даних системи сенсорного сортування руд. Нижче послідовно описано набір даних, обрану модель, схему валідації, побудову кривої навчання та методи екстраполяції.

**Набір даних та ознакова інженерія.** Набір містить 699 спостережень без пропущених значень (Рисунок 1). Цільова змінна – KT10valueMax (максимальне значення вихідного сигналу котушки KT10), яка корелює з вмістом магнітного матеріалу у зразку руди.

Первинні вхідні ознаки, отримані безпосередньо із сенсорної системи:

- Volume – об'єм зразка;
- Area – площа проекції зразка;
- MaxHeight – максимальна висота зразка;
- CenterDiviation – відхилення центру мас;
- UsedCoilArea – частка задіяної площі індуктивної котушки;
- SensorTemp – температура сенсора;
- SensorValueRAW – сирий вихідний сигнал сенсора;
- SensorId – ідентифікатор сенсора.

Для збагачення ознакового простору синтезовано три похідні ознаки:

- AspectRatio = MaxHeight / ( $\sqrt{\text{Area} + \epsilon}$ ) – відношення висоти до кореня з площі, характеризує форму зразка;
- Density = Volume / (Area +  $\epsilon$ ) – об’ємна щільність зразка;
- NormDeviation =  $\sqrt{(\text{CenterDeviation} / (\sqrt{\text{Area} + \epsilon}))}$  – нормалізоване відхилення центру мас.

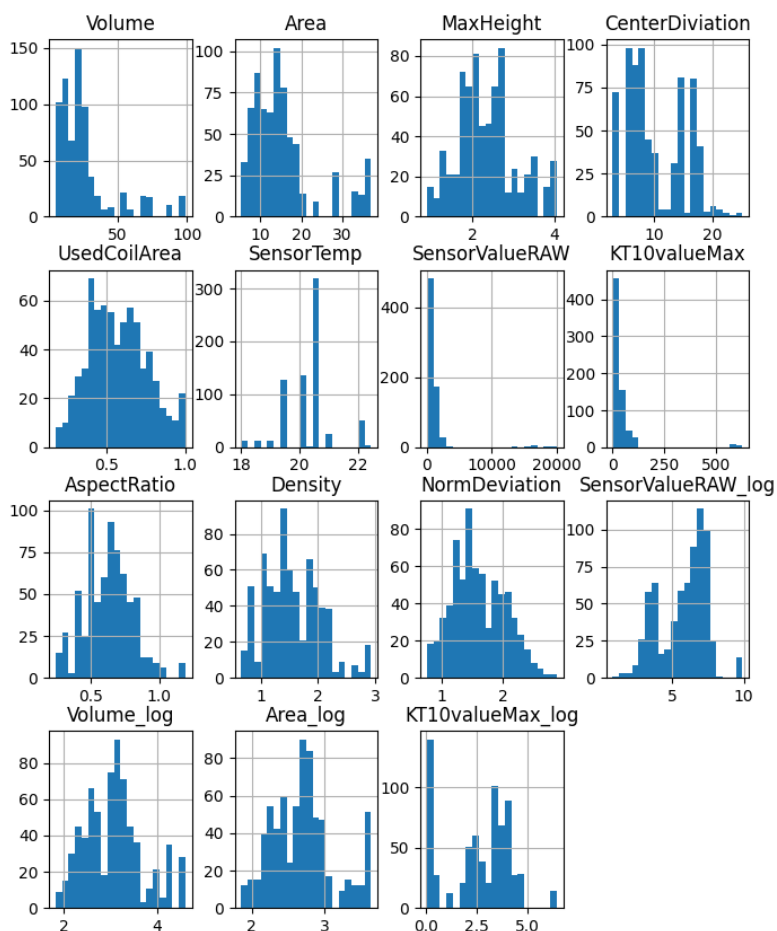


Рисунок 1 – Гістограми розподілу первинних та похідних ознак набору даних

Аналіз кореляційної матриці (Рисунок 2) виявив, що найбільш інформативною вхідною ознакою є SensorValueRAW ( $r = 0,985$ ), далі – Volume ( $r = 0,358$ ), Area ( $r = 0,313$ ) та UsedCoilArea ( $r = 0,286$ ). Температура сенсора та геометричні похідні ознаки мають низьку лінійну кореляцію з цільовою змінною.

**Модель та підбір гіперпараметрів.** Як основну модель обрано HistGradientBoostingRegressor у складі конвеєра з попереднім заповненням пропущених значень середнім (SimpleImputer) та логарифмічним перетворенням цільової змінної (TransformedTargetRegressor з  $\text{func} = \log1p$ ,  $\text{inverse\_func} = \text{expm1}$ ). Логарифмічне перетворення зменшує вплив правосторонньої асиметрії розподілу KT10valueMax та покращує стійкість навчання.

Підбір гіперпараметрів виконано за допомогою бібліотеки Optuna (100 спроб, байєсівська оптимізація, напрямок – мінімізація RMSE) у поєднанні з модифікованим правилом одного стандартного відхилення (1-SE rule): серед усіх конфігурацій у межах

порогу  $RMSE_{best} + SE$  обирається та, що має найкращий сумарний ранг за критеріями  $mean\_RMSE$ ,  $std\_RMSE$  та  $mean\_R^2$ . Знайдені оптимальні значення гіперпараметрів наведено нижче:

$max\_iter = 494$   
 $max\_depth = 5$   
 $min\_samples\_leaf = 13$   
 $learning\_rate = 0.1412$   
 $l2\_regularization = 0.213$   
 $max\_leaf\_nodes = 91$

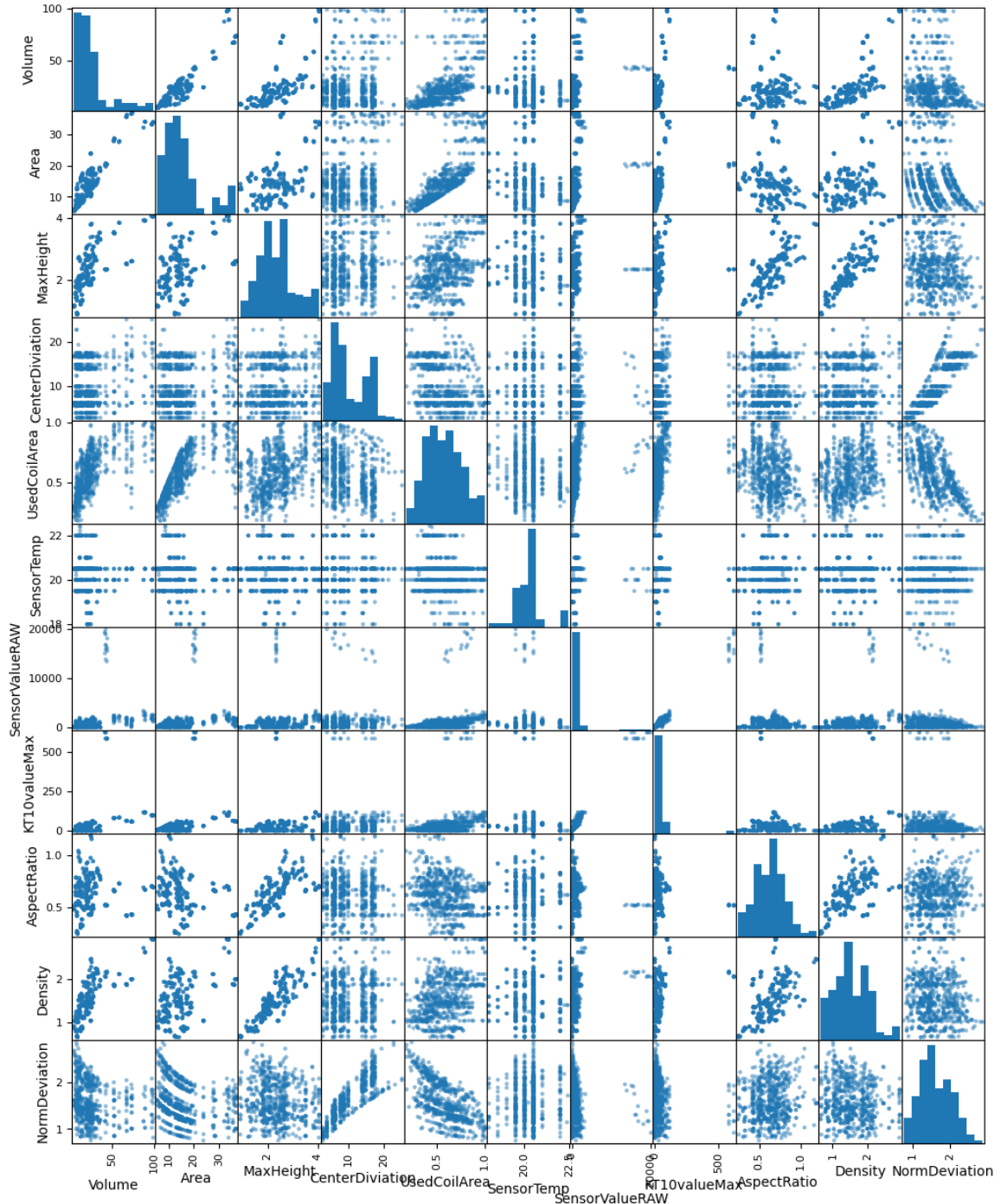


Рисунок 2 – Матриця кореляцій ознак із цільовою змінною  $KT10valueMax$

**Схема крос-валідації та загальна ефективність моделі.** Для оцінювання моделі застосовано 10-fold GroupKFold крос-валідацію, де групою є мітка зразка (Label – тип руди). Така схема виключає витік інформації між спостереженнями одного типу матеріалу через межу навчальної та тестової підвбірок.

Результати крос-валідації подано в Таблиці 1.

Таблиця 1

Результати 10-fold GroupKFold крос-валідації (HistGradientBoostringRegressor)

Метрика	Значення по фолдах	Середнє
R <sup>2</sup>	0,964; 0,841; 0,985; 0,992; 0,950; 0,948; 0,904; 0,858; 0,905; 0,973	0,932
RMSE	5,63; 9,43; 4,81; 16,14; 3,83; 4,56; 5,14; 4,98; 12,76; 27,72	9,50

Значення  $R^2 > 0,93$  підтверджує високу пояснювальну здатність моделі. Суттєвий розкид RMSE між фолдами (від 3,8 до 27,7) відображає неоднорідність складності задачі для різних груп зразків, що є характерним для реальних промислових наборів даних.

**Побудова кривої навчання.** Криву навчання побудовано для 12 розмірів навчальної підвбірки від 20 % до 100 % загального обсягу з кроком, рівномірно розподіленим у діапазоні [0,2; 1,0]. Для кожного розміру застосовувалась та сама схема 10-fold GroupKFold, як метрику обрано RMSE на валідаційних фолдах. Обчислювались середнє та стандартне відхилення RMSE по фолдах.

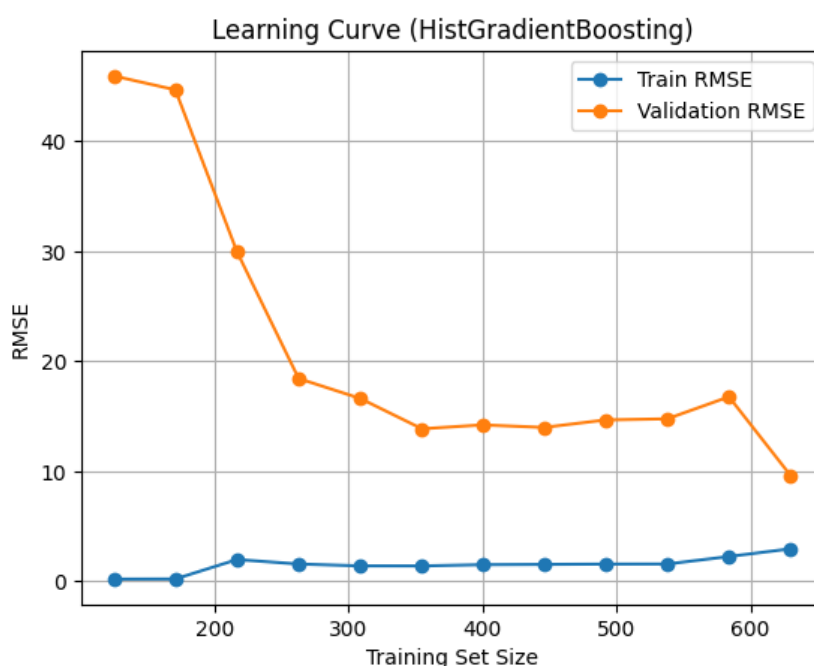


Рисунок 3 – Крива навчання моделі HistGradientBoostring

Спостерігається монотонне зниження RMSE зі збільшенням N із тенденцією до стабілізації у правій частині кривої – ознака входження в зону насичення. Навчальна RMSE суттєво нижча за валідаційну при малих N, що вказує на певний рівень перенавчання, який зменшується зі зростанням вибірки.

**Параметрична степенева екстраполяція.** Для апроксимації кривої навчання обрано степеневу функцію:

$$E(N) = a + b \cdot \left(\frac{N}{N_{ref}}\right)^{-\gamma} \quad (1)$$

де  $E(N)$  – значення RMSE при обсязі вибірки  $N$ ;  $\gamma$  – швидкість спадання похибки;  $b$  – масштаб початкового відхилення від асимптотичної межі;  $a$  – асимптотична RMSE, до якої прямує крива [1];  $N_{ref}$  – медіана  $N$  (застосовується для нормування, що покращує числову стабільність підгонки).

Параметри підбрані методом нелінійної регресії (`scipy.optimize.curve_fit`) з ваговим урахуванням стандартного відхилення RMSE по фолдах (`absolute_sigma=True`). Результати підгонки наведено в Таблиці 2.

Таблиця 2

Параметри степеневої апроксимації кривої навчання та їх 95 % довірчі інтервали

Параметр	Значення	95 % ДІ
a	10,795	[-13,58; 35,17]
b	3,073	[-26,43; 32,58]
$\gamma$	2,802	[-10,72; 16,32]
Зважений $R^2$	0,743	–

Прогнозована асимптотична RMSE (параметр  $a = 10,795$ ) задає нижню межу досяжної якості за наявного рівня шуму та неповноти ознак. Широки 95 % ДІ параметрів зумовлені відносно малим числом точок кривої навчання та значним розкидом RMSE між фолдами, що підкреслює необхідність урахування параметричної невизначеності при інтерпретації прогнозів.

**Точкові та ймовірнісні оцінки за методом NLS.** На основі підігнаної функції (1) отримано такі точкові оцінки мінімально достатнього обсягу вибірки:

–  $N$  для  $RMSE \leq 12$ : 559 спостережень;

–  $N$  для малопомітного приросту якості (виграш від подвоєння вибірки  $< 0,2$  RMSE): 1004 спостереження.

Монте-Карло симуляція ( $n-mc = 3000$  зразків із коваріаційної матриці параметрів, 729 валідних після відкидання фізично нереалістичних) дала ймовірнісні оцінки:

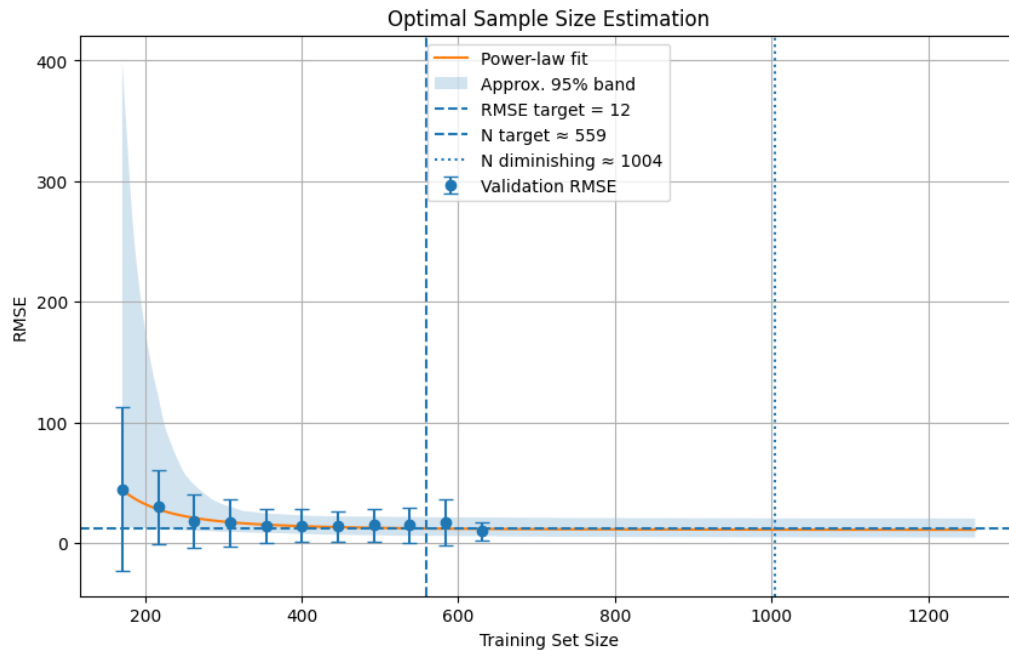
–  $P(RMSE \leq 12) \geq 50\%$ :  $N = 778$ ;

–  $P(\text{виграш від подвоєння} < 0,2) \geq 50\%$ :  $N = 1197$ .

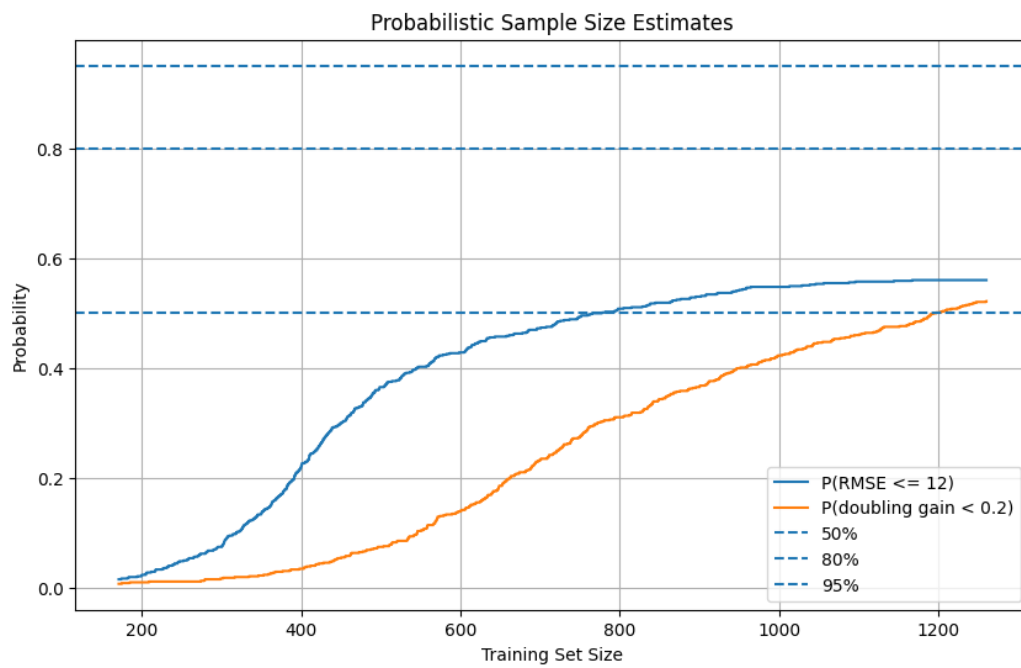
**GP-based learning-type curve.** Як більш просунутий статистичний підхід застосовано GP-based learning-type curve [6]. Залишки NLS-підгонки апроксимовано гауссівським процесом із ядром:

$$k(x, x') = C^2 \cdot RBF(\ell) + WhiteKernel(\sigma^2) \quad (2)$$

де вхід  $x = \log(N)$ . Підбрані параметри ядра:  $C^2 = 0,0188^2$ ;  $\ell = 0,955$ ;  $\sigma^2 = 3,73 \times 10^{-4}$ . Мале значення рівня шуму `WhiteKernel` підтверджує, що залишки NLS є структурованими, а не випадковими, – тобто детермінований скелет (1) вловлює основну тенденцію, а GP описує лише незначне систематичне відхилення.

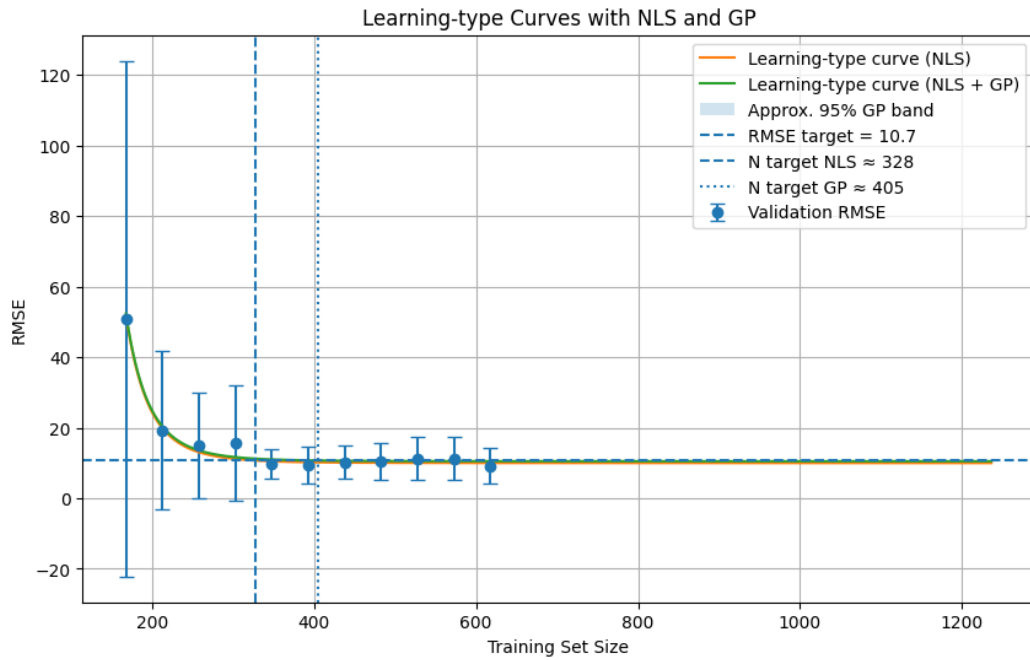


a

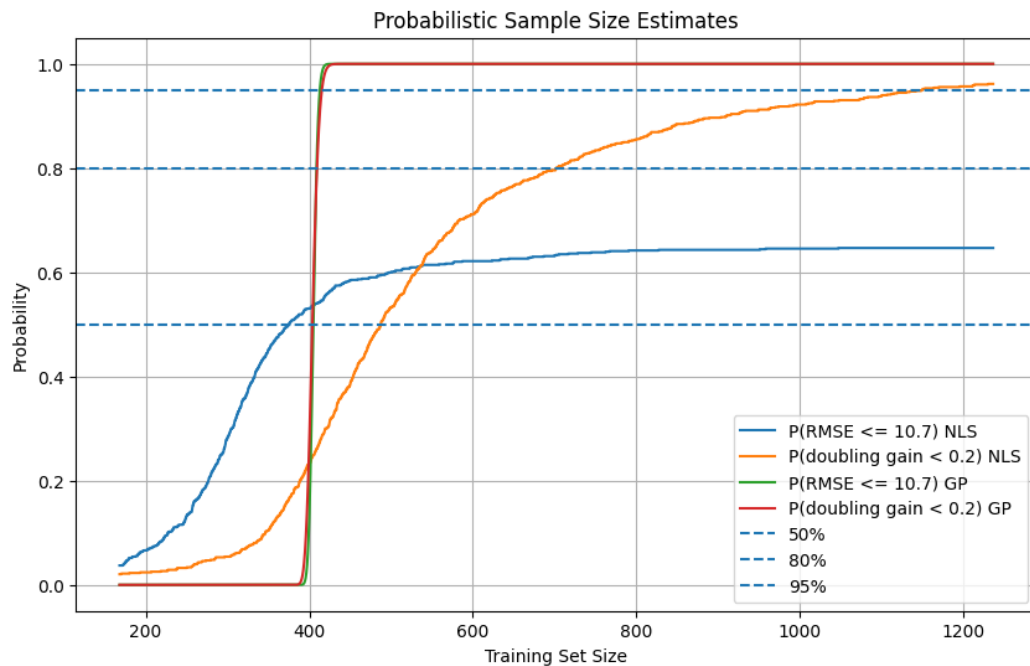


б

Рисунок 4 – Степенева екстраполяція кривої навчання з 95 ДІ (Монте-Карло)



а



б

Рисунок 5 – NLS та NLS+GP криві навчання з довірчими смугами

Порівняння точкових та ймовірнісних оцінок за методами NLS та NLS+GP наведено у Таблиці 3.

Порівняння NLS та NLS+GP виявляє закономірну відмінність: GP-based підхід дає більш консервативну, але статистично обґрунтовану оцінку необхідного N для досягнення  $RMSE \leq 12$  (756 проти 559). Оцінки порогу малопомітного приросту якості збігаються (1004). Максимальний розмір навчальної вибірки в експерименті становив 630 спостережень ( $\approx 90\%$  від загального обсягу датасету 699 після виділення

валідаційного фолду). Ця величина перевищує точкову оцінку NLS (559), проте залишається нижчою за ймовірнісні пороги NLS+GP: для надійності 80 % необхідно 782 спостереження, для 95 % – 810. З огляду на широкі довірчі інтервали параметрів степеневі функції, рекомендується орієнтуватися на оцінки NLS+GP та розширити загальний датасет до рівня, що забезпечить навчальну вибірку обсягом 780–810 зразків.

Таблиця 3

Порівняння оцінок мінімально достатнього обсягу навчальної вибірки

Критерій	NLS	NLS+GP
N для $RMSE \leq 12$ (точкова оцінка)	559	756
N для $P(RMSE \leq 12) \geq 50\%$	778	756
N для $P(RMSE \leq 12) \geq 80\%$	–	782
N для $P(RMSE \leq 12) \geq 95\%$	–	810
N для малопомітного приросту ( $\geq 50\%$ )	1197	1004
N для малопомітного приросту ( $\geq 80\%$ )	–	1160
Асимптотична RMSE (параметр a)	10,795	10,795

Таким чином, у даній роботі крива навчання розглядається як базовий емпіричний інструмент, параметрична екстраполяція – як основний практичний спосіб кількісного оцінювання достатнього обсягу вибірки, а GP-based learning-type curve – як більш просунутий статистичний варіант, що додатково характеризує невизначеність прогнозу. Така ієрархія підходів дозволяє, з одного боку, спиратися на фактично спостережувану поведінку моделі на реальних даних, а з іншого – оцінювати її ймовірну поведінку в режимах, які ще не були безпосередньо досягнуті в експерименті.

**Висновки.** Проведене дослідження підтвердило, що задача визначення мінімально достатнього обсягу навчальної вибірки для системи сенсорного сортування руд є розв'язуваною емпіричними методами на основі аналізу кривих навчання та їх екстраполяції.

Модель HistGradientBoostingRegressor продемонструвала високу якість на реальних сенсорних даних ( $R^2 = 0,93$ ), що підтверджує придатність обраного класу моделей до поставленої задачі. Побудована крива навчання демонструє монотонне спадання похибки зі збільшенням N з тенденцією до стабілізації у правій частині — що свідчить про входження в зону насичення та зменшення граничного ефекту від додаткових спостережень.

Параметрична екстраполяція степеневою функцією дозволила перейти від якісного аналізу кривої до кількісних оцінок достатнього обсягу вибірки. За результатами GP-based learning-type curve, для досягнення  $RMSE \leq 12$  з надійністю 95 % необхідно 810 спостережень у навчальній вибірці. Максимальний розмір навчальної вибірки в експерименті становив 630 спостережень — близько 90 % від загального обсягу датасету після виділення валідаційного фолду, — що є дещо меншим за рекомендований поріг. Поріг малопомітного приросту якості оцінено на рівні  $N \approx 1004$ , після якого подальше розширення вибірки не забезпечує статистично значущого покращення якості моделі.

Таким чином, для досягнення цільового рівня похибки з достатньою статистичною надійністю рекомендується розширити датасет до рівня, що забезпечить навчальну вибірку обсягом 780–810 зразків.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кісельов Б. Г., Сенько А. О. Вплив адитивних стохастичних збурень на нижню межу узагальнювальної похибки моделей регресії в сенсорних системах. Комп'ютерні інтелектуальні системи та мережі : матеріали XIX Всеукраїнської науково-практичної WEB-конференції аспірантів, студентів та молодих вчених, 25–27 березня 2026 р. Кривий Ріг : Криворізький національний університет, 2026. С. 156–159.
2. Viering T., Loog M. The Shape of Learning Curves: A Review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2023. Vol. 45, no. 12. P. 15050–15067. DOI: 10.1109/TPAMI.2021.3085003.
3. Figueroa R. L., Zeng-Treitler Q., Kandula S., Ngo L. H. Predicting sample size required for classification performance. *BMC Medical Informatics and Decision Making*. 2012. Vol. 12. Article 8. DOI: 10.1186/1472-6947-12-8.
4. Beleites C., Neugebauer U., Bocklitz T., Krafft C., Popp J. Sample size planning for classification models. *Analytica Chimica Acta*. 2013. Vol. 760. P. 25–33. DOI: 10.1016/j.aca.2012.11.007.
5. Vabalas A., Gowen E., Poliakoff E., Casson A. J. Machine learning algorithm validation with a limited sample size. *PLoS ONE*. 2019. Vol. 14, no. 11. Article e0224365. DOI: 10.1371/journal.pone.0224365.
6. Snell K. I. E., Archer L., Ensor J. et al. Sample size requirements for training clinical prediction models using participant-level meta-analysis. *Statistics in Medicine*. 2024. Vol. 43, no. 15. P. 2945–2975. DOI: 10.1002/sim.10121.
7. Kaplan J., McCandlish S., Henighan T. et al. Scaling Laws for Neural Language Models. *arXiv*. 2020. arXiv:2001.08361. DOI: 10.48550/arXiv.2001.08361.
8. Zöllner M. A., Huber M. F. Benchmark and Survey of Automated Machine Learning Frameworks. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2021. Vol. 70. P. 409–472. DOI: 10.1613/jair.1.11854.
9. Ke G., Meng Q., Finley T. et al. LightGBM: A Highly Efficient Gradient Boosting Decision Tree. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. 2017. Vol. 30. P. 3146–3154.
10. Domingos P. A few useful things to know about machine learning. *Communications of the ACM*. 2012. Vol. 55, no. 10. P. 78–87. DOI: 10.1145/2347736.2347755.
11. Cortes C., Jackel L. D., Solla S. A., Vapnik V., Denker J. S. Learning curves: Asymptotic values and rate of convergence. In: *Advances in Neural Information Processing Systems*. 1994. Vol. 6. P. 327–334.
12. Mukherjee S., Tamayo P., Rogers S. et al. Estimating dataset size requirements for classifying DNA microarray data. *Journal of Computational Biology*. 2003. Vol. 10, no. 2. P. 119–142. DOI: 10.1089/106652703321825928.

## REFERENCES

1. Kiselov, B. H., & Senko, A. O. (2026). *Vplyv adytyvnykh stokhastychnykh zburen' na nyzhniu mezhu uzahalniuvai'noi pokhybky modelei rehresii v sensorykh systemakh* [Influence of additive stochastic perturbations on the lower bound of regression model generalisation error in sensor systems]. In *Proceedings of the XIX All-Ukrainian Scientific-Practical WEB Conference* (pp. 156–159). KNU. [in Ukrainian]
2. Viering, T., & Loog, M. (2023). The shape of learning curves: A review. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 45(12), 15050–15067. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.2021.3085003>
3. Figueroa, R. L., Zeng-Treitler, Q., Kandula, S., & Ngo, L. H. (2012). Predicting sample size required for classification performance. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 12, Article 8. <https://doi.org/10.1186/1472-6947-12-8>
4. Beleites, C., Neugebauer, U., Bocklitz, T., Krafft, C., & Popp, J. (2013). Sample size planning for classification models. *Analytica Chimica Acta*, 760, 25–33. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2012.11.007>
5. Vabalas, A., Gowen, E., Poliakoff, E., & Casson, A. J. (2019). Machine learning algorithm validation with a limited sample size. *PLoS ONE*, 14(11), e0224365. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0224365>
6. Snell, K. I. E., Archer, L., Ensor, J., Maier, A., Debray, T. P. A., Burdett, S., Riley, R. D., & Ensor, J. (2024). Sample size requirements for training clinical prediction models using participant-level meta-analysis. *Statistics in Medicine*, 43(15), 2945–2975. <https://doi.org/10.1002/sim.10121>
7. Kaplan, J., McCandlish, S., Henighan, T., Brown, T. B., Chess, B., Child, R., Gray, S., Radford, A., Wu, J., & Amodei, D. (2020). *Scaling laws for neural language models* [Preprint]. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.08361>
8. Zöllner, M. A., & Huber, M. F. (2021). Benchmark and survey of automated machine learning frameworks. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 70, 409–472. <https://doi.org/10.1613/jair.1.11854>
9. Ke, G., Meng, Q., Finley, T., Wang, T., Chen, W., Ma, W., Ye, Q., & Liu, T.-Y. (2017). LightGBM: A highly efficient gradient boosting decision tree. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 30, 3146–3154.
10. Domingos, P. (2012). A few useful things to know about machine learning. *Communications of the ACM*, 55(10), 78–87. <https://doi.org/10.1145/2347736.2347755>
11. Cortes, C., Jackel, L. D., Solla, S. A., Vapnik, V., & Denker, J. S. (1994). Learning curves: Asymptotic values and rate of convergence. *Advances in Neural Information Processing Systems*, 6, 327–334.
12. Mukherjee, S., Tamayo, P., Rogers, S., Rifkin, R., Engle, A., Campbell, C., Golub, T. R., & Mesirov, J. P. (2003). Estimating dataset size requirements for classifying DNA microarray data. *Journal of Computational Biology*, 10(2), 119–142. <https://doi.org/10.1089/106652703321825928>

Received 17.04.2026.

Accepted 22.04.2026.

Published 30.04.2026

***Empirical determination of the minimum sufficient training sample size  
for machine learning models at a given error level***

*This article addresses the problem of empirically determining the minimum sufficient training sample size for machine learning regression models in ore sensor sorting systems. The relevance of this topic stems from the significant costs associated with creating representative datasets in the mining industry. The problem lies in the need to transition from a qualitative analysis of the learning curve to a quantitative assessment of the sufficient sample size for a given error level. The aim of the study is to evaluate a hierarchy of approaches: learning curve – parametric power-law extrapolation – GP-based learning-type curve. Methods: 10-fold GroupKFold cross-validation, Bayesian hyperparameter tuning (Optuna), non-linear regression, Gaussian processes. Results:  $R^2 = 0.93$  on test folds; the minimum sufficient sample size for  $RMSE \leq 12$  was estimated in the range of 559–810 observations. Key conclusion: the proposed method allows for a well-founded determination of the threshold beyond which further expansion of the sample ceases to yield practical benefits.*

*Keywords: machine learning; learning curve; minimum sample size; power-law approximation; Gaussian process; ore sorting; cross-validation; HistGradientBoosting; Neural Scaling Laws; extrapolation.*

**Кісельов Богдан Геннадійович** – аспірант кафедри автоматизації, комп’ютерних наук і технологій, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-9338-1031>

**Сенько Антон Олександрович** – канд. техн. наук, кафедра комп’ютерних систем та мереж, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4104-8372>

**Купін Андрій Іванович** – д.т.н., професор, кафедра комп’ютерних систем та мереж, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7569-1721>

**Балик Дмитро Костянтинович** – інженер-програміст, ТОВ «НВП Гамаюн».

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-4768-8576>

**Bohdan Kiselov** – PhD Student, Department of Automation, Computer Sciences and Technology, Kryvyi Rih National University, Ukraine.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-9338-1031>

**Anton Senko** – Candidate of Technical Sciences, Department of Computer Systems and Networks, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4104-8372>

**Andrii Kupin** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of Computer Systems and Networks, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7569-1721>

**Dmytro Balyk** – “SPE Hamaiun” LLC.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-4768-8576>

## МЕТОД ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ЗОБРАЖЕНЬ

*Анотація.* У статті розглянута задача покращення якості цифрових зображень. Запропоновано адаптивний метод покращення якості цифрових зображень, що ґрунтується на початковому визначенні типу вхідного зображення та застосуванні моделей згорткових нейронних мереж архітектур GFPGAN та Real-ESRGAN, а також цифрового методу перетворення зображень AIEA на основі визначеного типу зображення. Розроблено програмне забезпечення покращення якості цифрових зображень. Ефективність запропонованого методу покращення якості зображень за метриками PSNR та SSIM становить 29,63 та 0,913 відповідно для типу портретних зображень, 29,14 та 0,889 відповідно для типу зашумлених зображень, 28,47 та 0,861 для інших типів зображень.

*Ключові слова:* покращення зображень, адаптивна обробка, GFPGAN, Real-ESRGAN, AIEA, PSNR, SSIM, цифрова обробка зображень, нейронні мережі.

**Постановка проблеми.** Підвищення якості цифрових зображень є складною задачею в умовах неоднорідності вхідних даних – розташування джерел освітлення сцени, положення та орієнтація об'єктів сцени та інші умови захоплення сцени визначають наявність різномірних артефактів на цифрових зображеннях. Застосування одного алгоритму до таких неоднорідних цифрових зображень спрощує реалізацію системи покращення якості цифрових зображень, але залишається проблема з нестабільною ефективністю, яка характеризується недостатнім відновленням об'єктів зображень або надмірною зміною яскравості окремих областей зображення.

Метою цієї статті є дослідження ефективності застосування адаптивного підходу до покращення якості цифрових зображень. Адаптивний метод покращення якості цифрових зображень ґрунтується на початковому визначенні типу вхідного зображення та застосуванні моделей згорткових нейронних мереж архітектур GFPGAN та Real-ESRGAN, а також цифрового методу перетворення зображень AIEA (Adaptive Image Enhancement Algorithm) на основі визначеного типу зображення. Адаптивний підхід дозволяє враховувати вміст зображення та використовувати найбільш ефективний інструмент покращення якості.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Класичні методи покращення якості цифрових зображень – еквалізація гістограми (HE, CLAHE), фільтри Гауса, медіанний, білатеральний, а також інтерполяційні методи збільшення – відзначаються простотою

реалізації, невисокою обчислювальною складністю та швидкодією, що робить їх придатними для прикладних систем оброблення зображень у реальному часі. Разом із тим такі методи, як правило, виконують локальне або глобальне перетворення яскравості, контрасту чи різкості без урахування семантичного вмісту сцени, тому їхня ефективність істотно залежить від типу вхідного зображення та характеру спотворень. Унаслідок цього для неоднорідних цифрових зображень, що містять портретні сцени, текстурні області, дрібні деталі або складні деградації, класичні методи не завжди забезпечують достатню якість відновлення та можуть призводити до надмірного підсилення шуму, локальних артефактів або нестабільного покращення окремих фрагментів зображення [6], [7], [8], [9].

Сучасні нейромережеві моделі покращення якості цифрових зображень орієнтовані на глибший аналіз структури сцени та відновлення складних просторових залежностей. Зокрема, модель DnCNN [2] ґрунтується на принципі residual learning і batch normalization, що дозволяє ефективно виділяти шумову складову та відновлювати чисте зображення навіть у задачах blind denoising. Модель EDSR [3] є розвитком глибоких залишкових мереж для задачі super-resolution і відзначається оптимізацією residual-архітектури шляхом вилучення надлишкових модулів, що забезпечує кращу реконструкцію високочастотних деталей. Архітектура ESRGAN [4] розвиває ідеї SRGAN за рахунок використання блоків RRDB, удосконаленої перцептуальної функції втрат і adversarial-навчання, що дає змогу отримувати більш природні текстури та вищу візуальну правдоподібність результату. Такі підходи загалом демонструють кращі значення метрик PSNR та SSIM [6], [7] або вищу перцептуальну якість порівняно з класичними методами, однак потребують більших обчислювальних ресурсів, точного підбору навчальних даних і, що особливо важливо, відповідності архітектури характеру вхідного зображення.

Окрему групу становлять спеціалізовані нейромережеві моделі, орієнтовані не на універсальне покращення будь-яких зображень, а на конкретні класи деградацій. Зокрема, GFPGAN [10] призначений для blind face restoration і використовує генеративний лицевий пріор, що дозволяє ефективно відновлювати геометрію обличчя, локальну структуру та природність текстур у портретних зображеннях. Real-ESRGAN [11], своєю чергою, орієнтований на real-world blind super-resolution і призначений для покращення реалістичних зображень із низькою деталізацією, розмиттям або складними змішаними спотвореннями. Отже, аналіз сучасних досліджень свідчить, що найперспективнішим є не використання єдиного універсального алгоритму для всіх типів вхідних даних, а побудова адаптивного підходу, у якому вибір методу покращення визначається вмістом зображення та характером його деградації. Саме тому актуальним є адаптивний метод покращення якості цифрових зображень, який інтегрує моделі згорткових нейронних мереж архітектур GFPGAN та Real-ESRGAN, а також цифровий метод перетворення зображень AIEA, і застосовує відповідний алгоритм на основі визначеного типу зображення [10], [11].

**Мета дослідження.** Метою даної статті є розроблення адаптивного методу та програмного забезпечення для покращення якості цифрових зображень, що ґрунтується

на початковому визначенні типу вхідного зображення та застосуванні моделей згорткових нейронних мереж архітектур GFPGAN та Real-ESRGAN, а також цифрового методу перетворення зображень AIEA на основі визначеного типу зображення.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Запропонований метод покращення якості цифрових зображень складається з трьох послідовних етапів. На першому етапі виконується аналіз вхідного зображення та визначення його типу за візуальними ознаками: портретність сцени, рівень деталізації, наявність розмиття або інших характерних спотворень. На другому етапі формується алгоритм оброблення. Якщо зображення належить до портретних, використовується нейронна мережа архітектури GFPGAN для відновлення обличчя та покращення локальної структури. Якщо виявлено недостатню деталізацію або розмиття, застосовується нейронна мережа архітектури Real-ESRGAN для підвищення різкості та роздільної здатності. Для інших типів зображень використовується метод AIEA, що реалізує глобальну тональну корекцію та локальне підсилення деталей у просторі CIELAB [8, 9]. На третьому етапі формується фінальний результат із урахуванням обраного алгоритму оброблення.

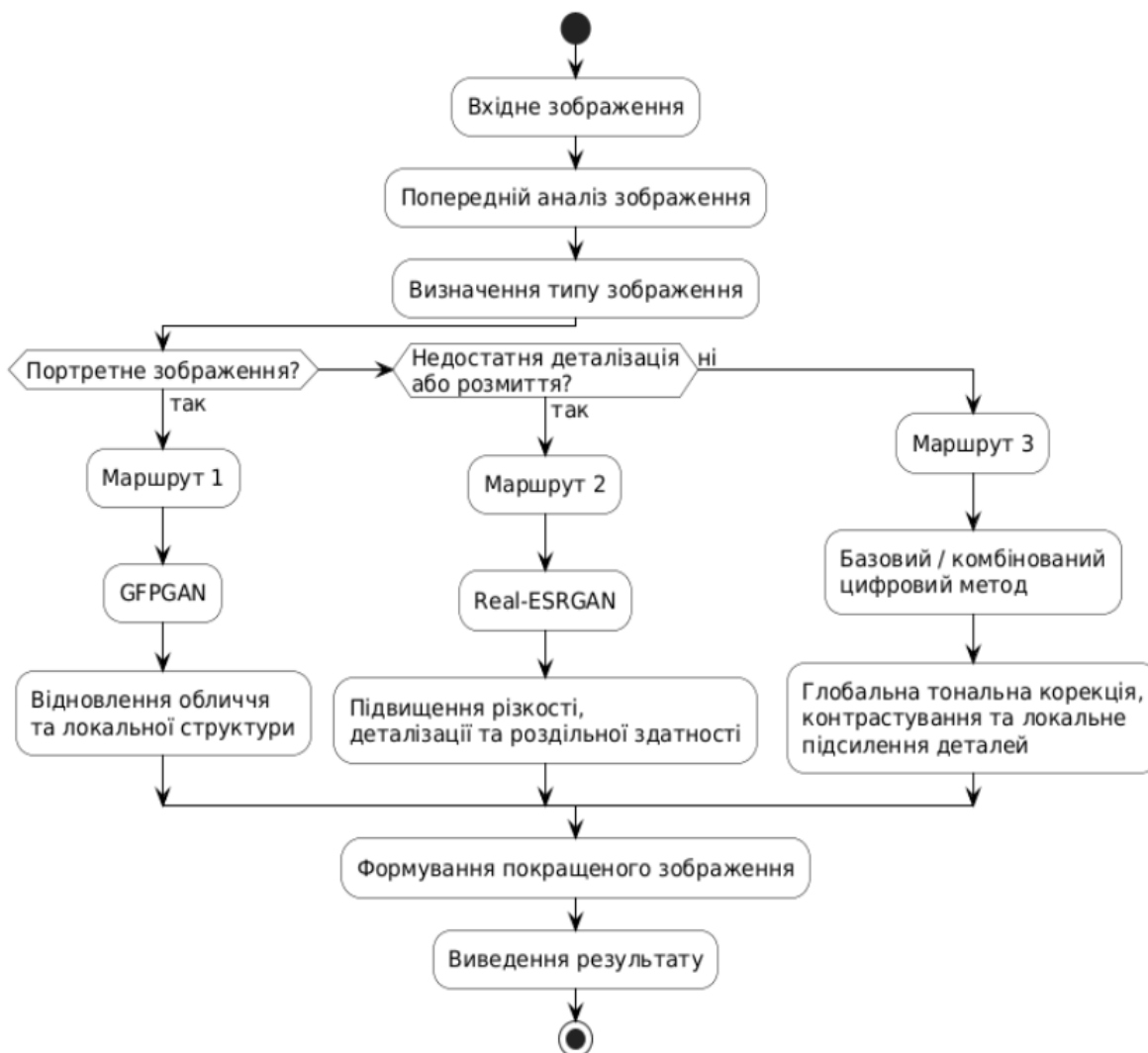


Рисунок 1 - Структурна схема роботи методу AIEA

Модифікований метод AIEA передбачає не застосування одного універсального конвеєра до всіх вхідних даних, а попередній аналіз зображення з подальшим вибором спеціалізованого маршруту покращення. На першому етапі виконується оцінка характеристик вхідного зображення та визначення його типу за візуальними ознаками. Далі формується рішення щодо маршруту обробки: для портретних зображень використовується неймережева модель GFPGAN, для зображень із недостатньою деталізацією або розмиттям – Real-ESRGAN, а для інших типів сцен – базовий або комбінований цифровий метод покращення. Така структура забезпечує адаптацію обробки до змісту зображення, підвищує гнучкість програмного забезпечення та дозволяє поєднати переваги спеціалізованих неймережевих моделей і класичних алгоритмів цифрової обробки зображень.

Результати. Запропонований метод було застосовано на базі цифрових зображень, що охоплювала портретні зображення, зображення з недостатньою деталізацією або розмиттям та інші. Така тестова база даних дозволяє перевірити точність вибору алгоритму покращення якості зображень та його ефективність.

У Таблиці 1 наведений перелік алгоритмів оброблення та їх призначення, на основі яких ґрунтується запропонований метод покращення якості цифрових зображень.

Таблиця 1

Алгоритми оброблення в запропонованому методі покращення якості цифрових зображень

Алгоритм	Вміст зображення	Призначення
GFPGAN	Портретні зображення	Покращення текстурних характеристик
Real-ESRGAN	Зашумлені зображення	Покращення різкості, яскравості
AIEA	Інші типи зображень	Покращення колірної розподілу

На Рис. 2, 3 продемонстрована робота програмного забезпечення покращення якості цифрових зображень на основі запропонованого методу – після визначення типу вхідного зображення, система автоматично визначає алгоритм оброблення, який дозволяє покращувати текстуру, яскравість, різкість або колірний розподіл зображення на основі вмісту.

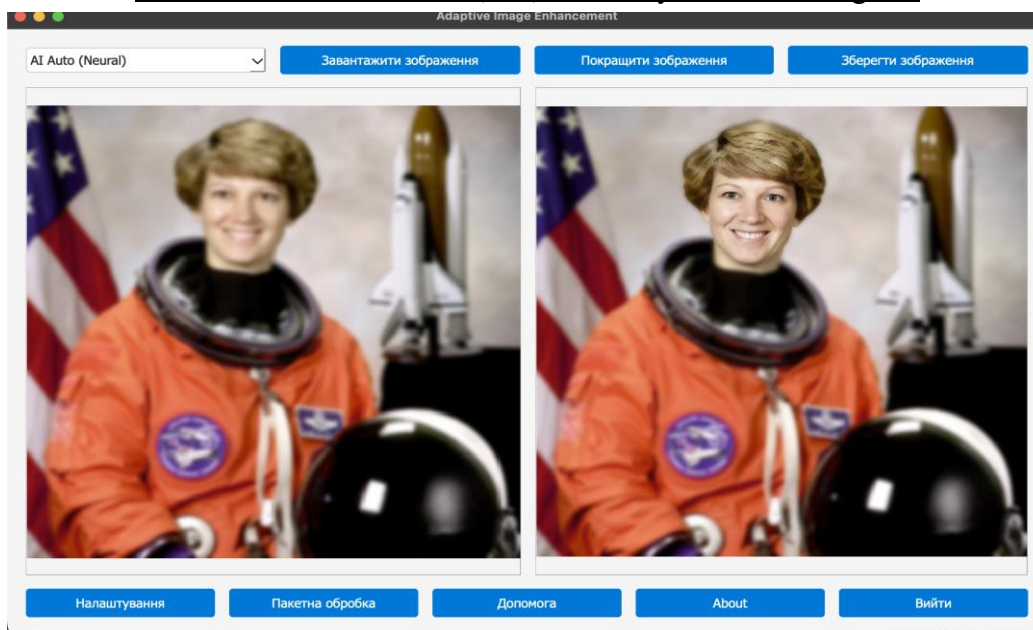


Рисунок 2 - Приклад роботи запропонованого методу

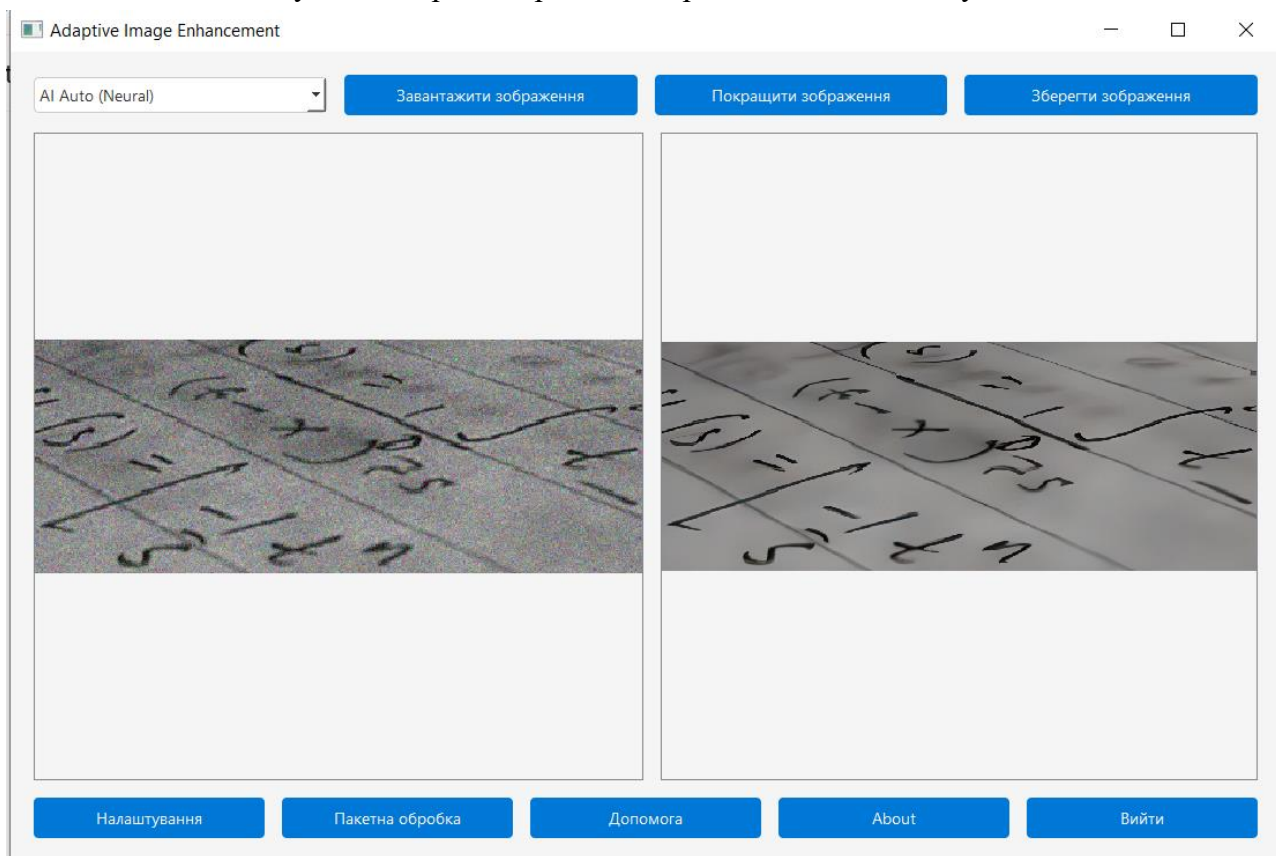


Рисунок 3 - Приклад роботи запропонованого методу

Аналіз ефективності запропонованого методу покращення якості цифрових зображень. Ефективність роботи запропонованого методу оцінюється параметрами PSNR:

$$PSNR = 10 \log_{10} \left( \frac{MAX_i^2}{MSE} \right), MSE = \frac{1}{MN} \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N [I(i,j) - K(i,j)]^2$$

та SSIM:

$$SSIM(I,K) = \frac{(2\mu_I\mu_K + C_1)(2\sigma_{IK} + C_2)}{(\mu_I^2 + \mu_K^2 + C_1)(\sigma_I^2 + \sigma_K^2 + C_2)}$$

Для архітектури системи покращення якості цифрових зображень на основі запропонованого важливими є два аспекти – точність визначення вмісту зображення та ефективність покращення якості цифрового зображення відповідним алгоритмом. Таким чином, оцінювання охоплює не лише результат окремого алгоритму, а й ефективність маршрутизації як керувального механізму.

Алгоритм AIEA зменшує ризик як недоопрацювання, так і надмірного перетворення цифрових зображень. Алгоритм GFPGAN краще відновлює структуру обличчя та дрібні локальні деталі для портретних зображень, для розмитих і низькодеталізованих зображень алгоритм Real-ESRGAN ефективніше підвищує різкість і візуальну виразність.

У Таблиці 2 продемонстрована оцінка ефективності запропонованого методу покращення якості цифрових зображень. Для портретних зображень найкращі значення обох метрик демонструє GFPGAN. Це пояснюється тим, що модель спеціально спроектована для відновлення обличчя і краще відтворює локальну геометрію, контури та текстуру обличчя, ніж універсальні алгоритми. Для розмитих або низькодеталізованих зображень найкращі результати отримано для Real-ESRGAN, що узгоджується з його призначенням як алгоритму blind super-resolution для реальних деградованих даних. Для загальносценкових зображень найбільш збалансовані значення PSNR та SSIM зберігає алгоритм AIEA, оскільки в цьому випадку надмірно спеціалізовані генеративні методи не дають додаткової переваги та можуть поступатися класичному покращенню за стабільністю відтворення глобальної структури сцени.

Таблиця 2

Результат аналізу ефективності запропонованого методу покращення якості цифрових зображень

Параметри	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM	PSNR	SSIM
Алгоритм оброблення	AIEA		GFPGAN		Real-ESRGAN	
Портретні зображення	27,84	0,841	<b>29,63</b>	<b>0,913</b>	28,71	0,876
Зашумлені зображення	25,96	0,782	24,88	0,741	<b>29,14</b>	<b>0,889</b>
Інші типи зображень	<b>28,47</b>	<b>0,861</b>	26,12	0,803	27,94	0,846

**Висновок.** У статті розглянута задача покращення якості цифрових зображень. Запропоновано адаптивний метод покращення якості цифрових зображень, що ґрунтується на початковому визначенні типу вхідного зображення та застосуванні моделей згорткових нейронних мереж архітектур GFPGAN та Real-ESRGAN, а також цифрового методу перетворення зображень AIEA на основі визначеного типу зображення. Обмеженнями запропонованого методу є точність визначення вмісту зображення на початковому етапі оброблення, а також вища обчислювальна вартість нейромережових алгоритмів перетворення зображень.

Розроблено програмне забезпечення покращення якості цифрових зображень. Ефективність запропонованого методу покращення якості зображень за метриками PSNR та SSIM становить 29,63 та 0,913 відповідно для типу портретних зображень, 29,14 та 0,889 відповідно для типу зашумлених зображень, 28,47 та 0,861 для інших типів зображень.

Подальша робота пов'язана з удосконаленням алгоритму визначення вмісту зображення, а також розробленням нових алгоритмів перетворення та автоматичним вибором порогів перемикання між алгоритмами.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Ledig, C., Theis, L., Huszár, F., Caballero, J., Cunningham, A., Acosta, A., Aitken, A., Tejani, A., Totz, J., Wang, Z., & Shi, W. (2017). Photo-realistic single image super-resolution using a generative adversarial network. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 105–114). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2017.19>
2. Zhang, K., Zuo, W., Chen, Y., Meng, D., & Zhang, L. (2017). Beyond a Gaussian denoiser: Residual learning of deep CNN for image denoising. *IEEE Transactions on Image Processing*, 26(7), 3142–3155. <https://doi.org/10.1109/TIP.2017.2662206>
3. Lim, B., Son, S., Kim, H., Nah, S., & Lee, K. M. (2017). Enhanced deep residual networks for single image super-resolution. In Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops (pp. 1132–1140). <https://doi.org/10.1109/CVPRW.2017.151>
4. Wang, X., Yu, K., Wu, S., Gu, J., Liu, Y., Dong, C., Loy, C. C., Qiao, Y., & Tang, X. (2018). ESRGAN: Enhanced super-resolution generative adversarial networks. *ECCV Workshops*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.00219>
5. Shocher, A., Cohen, N., & Irani, M. (2018). Zero-shot super-resolution using deep internal learning. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 3118–3126). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2018.00329>
6. Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4), 600–612. <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>
7. Horé, A., & Ziou, D. (2010). Image quality metrics: PSNR vs. SSIM. In 2010 20th International Conference on Pattern Recognition (pp. 2366–2369). <https://doi.org/10.1109/ICPR.2010.579>
8. OpenCV. (2026). OpenCV official documentation. Retrieved April 2, 2026, from <https://docs.opencv.org/4.x/>
9. Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing* (4th ed.). Pearson.
10. Wang, X., Li, Y., Zhang, H., & Shan, Y. (2021). Towards real-world blind face restoration with generative facial prior. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 9168–9178). <https://doi.org/10.1109/CVPR46437.2021.00905>

11. Wang, X., Xie, L., Dong, C., & Shan, Y. (2021). Real-ESRGAN: Training real-world blind super-resolution with pure synthetic data. In Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops (pp. 1905–1914).

<https://doi.org/10.1109/ICCVW54120.2021.00217>

Received 17.04.2026.

Accepted 22.04.2026.

Published 30.04.2026

### ***Method and software for image quality enhancement***

*Image enhancement remains an important problem because real scenes are captured under different illumination conditions, with varying object positions, blur, noise, and loss of fine details. Classical techniques based on histogram equalization, brightness correction, and filtering are still widely used because of their low computational cost, yet they are often insufficiently adaptive to the scene content. At the same time, deep-learning-based models such as GFPGAN and Real-ESRGAN provide high-quality restoration results for specific categories of images, although their efficiency strongly depends on whether the chosen architecture matches the actual input data.*

*The purpose of this paper is to develop an adaptive method and software for image quality enhancement that combines the digital AIEA method with the GFPGAN and Real-ESRGAN neural-network models and automatically selects the processing route according to the detected image type.*

*The proposed method consists of preliminary image analysis, image-type identification, and content-aware routing to a specialized enhancement algorithm. Portrait images are processed by GFPGAN, which restores facial structure and local details. Blurred or low-detail images are processed by Real-ESRGAN, which improves sharpness, detail reproduction, and effective resolution. Other scene types are enhanced by the AIEA digital method, which performs global tonal correction, contrast improvement, and local detail enhancement. The software was implemented as a desktop application that supports automatic routing, manual algorithm selection, result visualization, and saving of enhanced images. Experimental evaluation was carried out on three image classes: portrait images, blurred or low-detail images, and general-scene images. Quantitative comparison using PSNR and SSIM showed that the best results are obtained when the selected algorithm matches the image content: GFPGAN is the most effective for portraits, Real-ESRGAN is the most effective for blurred or low-detail images, and AIEA provides balanced enhancement for general-scene images.*

*The proposed approach adapts the enhancement route to the image content and combines the advantages of classical digital processing with specialized neural-network models. This improves the flexibility of the software and provides a practical basis for further extension with new processing routes and more accurate image-type identification.*

*Keywords: image enhancement, adaptive processing, GFPGAN, Real-ESRGAN, AIEA, PSNR, SSIM, digital image processing, neural networks.*

**Сметана Максим Олександрович** – магістр кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Україна.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-0036-7488>

**Шкурат Оксана Сергіївна** – доцент кафедри програмного забезпечення комп’ютерних систем, Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, Київ.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7633-9121>

**Smetana Maksym**– Master’s student of the Department of Computer Systems Software, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Ukraine.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0006-0036-7488>

**Shkurat Oksana** – Associate Professor of Computer Systems Software Department, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7633-9121>

## ПРОБЛЕМИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВБУДОВАНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ З МОДУЛЕМ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

*Анотація.* У статті досліджується актуальна проблема підвищення ефективності вбудованих систем автоматичного керування (САК), в яких робота віртуальних датчиків виконується за алгоритмами комп'ютерного зору на базі глибоких нейромереж. Виконаний аналіз сучасних підходів до компресії нейромережеских моделей (квантування, проріджування) у контексті парадигм Edge AI та TinyML. За результатом огляду робіт інших авторів висвітлена недостатня узгодженість параметрів САК: оптимізація моделей виключно за метриками машинного навчання, без урахування динаміки об'єкта, що знижує запаси стійкості системи через зміну статистики помилок та внесення стохастичного шуму. Сформульовані завдання дослідження, що поєднує цифрові двійники, емуляцію та апаратну реалізацію (Hardware-in-the-loop) поставленої задачі пошуку оптимального компромісу між затримкою інференсу та точністю оцінки стану об'єкта для підвищення ефективності автономних систем.

*Ключові слова:* комп'ютерний зір, вбудовані системи, автоматичне керування, TinyML, компресія нейромереж, запас стійкості, цифрові двійники, апаратно-орієнтована оптимізація.

**Вступ та обґрунтування актуальності дослідження.** Розвиток автономної робототехніки, безпілотних літальних апаратів (БПЛА) вимагає розширення сенсорних можливостей кіберфізичних систем. Тому в сучасних системах керування все частіше відбувається заміна коштовних стандартних фізичних датчиків на модулі комп'ютерного зору (КЗ), які забезпечують візуальний зворотній зв'язок керованого об'єкта з системою автоматичного керування (САК), тобто за наявності вказаного елемента САК механізми здатні орієнтуватись в просторі, розпізнавати складні об'єкти, будувати адаптивні маршрути і таке інше. Крім того, скорочення кількості фізичних датчиків підвищує автономність САК без суттєвої втрати точності та гнучкості роботи керованого об'єкта в цілому [1].

Проте інтеграція сучасних алгоритмів КЗ (на базі згорткових нейромереж чи трансформерів) у периферійні пристрої (Edge devices) ускладнюється жорсткими вимогами до апаратного забезпечення [1]. У вбудованих системах керування проблема застосування мікроконтролерів та одноплатних комп'ютерів полягає в обмеженнях основних характеристик, до яких відносять лімітовану пам'ять, обчислювальну потужність і ресурси енергоспоживання. Таким чином, для впровадження в периферійні при-

строї "важких" нейромереж, необхідно адаптувати та стискати (компресувати) їх математичні моделі.

Водночас треба враховувати відомий факт, що агресивна компресія має критичний недолік - вона знижує точність розпізнавання. Крім того, у замкненому контурі керування, який реалізується в периферійних пристроях, навіть незначна похибка моделі спричиняє серйозні системні наслідки: хибні рішення регулятора, виникнення автоколиваний, втрату цілі або повну дестабілізацію керованого об'єкта. Отже, стиснення нейромережевої моделі повинно відбуватись за визначеними умовами для конкретного керованого об'єкта, тобто традиційної "програмної" оптимізації в таких задачах недостатньо.

Таким чином актуальність роботи полягає в проблемі ефективного поєднання обчислювальної спроможності нейромережі та коректної роботи САК автономних систем. Досягнення цього балансу дозволить підвищити загальну (інтегральну) надійність та ефективність сучасних автономних пристроїв.

**Сучасні методи підвищення обчислювальної ефективності (Edge AI та TinyML).** Як зазначено в огляді С. El Zeinaty та співавторів [1], перенесення алгоритмів комп'ютерного зору з хмарних серверів безпосередньо на бортові пристрої реалізується завдяки підходам Edge Computing та TinyML. При цьому для забезпечення стабільної частоти кадрів (FPS) на ресурсно-обмежених апаратних платформах розробники застосовують комплекс технік просторово-часової оптимізації моделей:

- **Квантування (Quantization):** Перетворення значень ваг та активацій нейромережі з точного формату з рухомою комою (FP32) у цілочисельні формати меншої рядності (INT16, INT8, INT4). Це зменшує споживання пам'яті у 4-8 разів і дозволяє процесорам використовувати енергоефективні інструкції для цілочисельних обчислень.

- **Проріджування (Pruning):** Виявлення та видалення найменш важливих синаптичних зв'язків у нейромережі, а іноді - цілих каналів чи фільтрів. Наприклад, В. Jiang та співавтори [2] пропонують об'єднати цей підхід із квантуванням (стратегія Single-shot pruning and quantization), що прискорює інференс у 6-8 разів.

- **Дистиляція знань (Knowledge Distillation) та пошук архітектур (NAS):** Навчання компактних "моделей-учнів" за допомогою великих "моделей-вчителів", а також автоматичний пошук найкращої структури мережі для конкретного мікропроцесора.

Ще один відомий підхід підвищення обчислювальної ефективності має в основі адаптивне розподілення обчислень. Зокрема, С. McKee [6] пропонує архітектуру edge-cloud для систем інспекції: рутинні задачі обробляє периферійний пристрій, а складні випадки передаються у хмару. Однак для систем реального часу (як-от стабілізація БПЛА) втрата зв'язку з хмарою є неприпустимою, тому модель має гарантовано та повністю працювати на бортовому комп'ютері.

Попри всі переваги цих методів, Park J. та співавтори [3] зазначають: будь-яка компресія неминуче вимагає компромісу між точністю (Accuracy) та затримкою (Latency). Крім того, М. de Prado [4] наголошує, що квантовані моделі стають менш

стійкими (робастними) до зовнішніх збурень, а це створює пряму загрозу безпеці системи керування.

**Узгодження між обчислювальною ефективністю та якістю керування.** Однією з проблем сучасних досліджень є те, що фахівці з Data Science оптимізують нейромережі переважно ізольовано від об'єкта керування. Вони оцінюють якість детектора статичними метриками (mAP, F1-score). Проте інтеграція такого модуля в контур зворотного зв'язку реальної фізичної системи докорінно змінює характер його роботи.

**- Відеосенсор як динамічна ланка із запізненням.** Загальновідомо, що в класичній теорії автоматичного керування (ТАК) часову затримку прийнято розглядати як ланку чистого запізнювання, що описується передавальною функцією наступного вигляду:

$$W_{\tau}(s) = e^{-sT} \quad (1)$$

де  $T$  - час затримки.

Така ланка створює фазове запізнення, яке лінійно зростає зі збільшенням частоти, що закономірно призводить до зниження запасу стійкості системи по фазі. Згідно з теорією автоматичного керування, перевищення так званої граничної затримки (Delay Margin) робить систему нестійкою попри будь-яку якість вимірювань. Наочним прикладом є використання «важкої» моделі (для розпізнавання та обчислення координат керованого об'єкту) з часом інференсу 150 мс для керування об'єктом із механічною сталою часу 50 мс - це гарантовано спричинить втрату керованості та руйнування системи, незважаючи на абсолютно безпомилкову роботу комп'ютерного зору.

**- Вплив компресії на статистику помилок та стохастичний шум.** Щоб подолати проблему затримки, розробники компресують моделі. Це різко зменшує час інференсу  $T$  (наприклад, до 15 мс) і відновлює фазовий запас стійкості.

Однак стиснення спотворює статистику помилок моделі. Зокрема, зниження розрядності ваг генерує шум квантування. На практиці він виглядає як високочастотний "джиттер" - хаотичне тремтіння координат обмежувальної рамки. Математично сигнал  $y(t)$  на виході такого віртуального датчика описується рівнянням:

$$y(t) = f_{cnn} (x(t - \tau(t))) + w(t), \quad (2)$$

де  $f_{cnn}$  (function of Convolutional Neural Network) - це функція перетворення згорткової нейромережі (модуля комп'ютерного зору), яка відображає реальний просторовий стан об'єкта у вихідні координати обмежувальної рамки;  $x(t)$  - реальний стан керованого об'єкта,  $\tau(t)$  - змінна затримка інференсу, а  $w(t)$  - стохастичний шум вимірювань, спричинений компресією;  $t$  - час.

Наприклад, у контурі керування цей шум діє вкрай деструктивно, особливо на диференціальну складову ПІД (пропорційно-інтегрально-диференціальний) - регулятора. У відповідь на хибні коливання координат регулятор починає хаотично "смикати" виконавчі механізми. Це різко погіршує якість перехідного процесу та прискорює механічний знос обладнання.

**Стан досліджень в українському та світовому науковому просторі.** Дослідження в галузі інтеграції комп'ютерного зору в системи керування в Україні набули критичної актуальності національного масштабу, що прямо пов'язано з нагальними потребами у розробці автономних БПЛА, систем автосупроводу цілей та наземних роботизованих платформ.

Аналіз вітчизняного наукового простору свідчить про значні успіхи в окремих напрямках цієї галузі. Наприклад, у роботі [7] успішно вирішуються завдання розпізнавання та моніторингу об'єктів за допомогою машинного навчання, проте оптимізація розглядається переважно в контексті офлайн-аналізу.

Дослідження І. Худякова та ін. [8] охоплюють моделювання інформаційних систем для дистанційного моніторингу транспортних засобів, де акцент робиться на архітектурі передачі даних, а не на динаміці керування в реальному часі на Edge-пристроях.

Крім того, вітчизняні науковці активно досліджують методи зменшення надлишковості самих візуальних даних. Наприклад, у роботі фахівців ВНТУ О. Кавки та ін. [10] детально проаналізовано алгоритми стиснення зображень із втратами (на основі дискретного косинусного перетворення та вейвлетів). Проте вплив неминучих артефактів такого стиснення на точність нейромережевого інференсу, коли зображення надходить безпосередньо в контур керування, залишається недослідженим.

Аналітичні підходи до обробки інформації в складних технічних системах (зокрема аерокосмічного профілю) активно розробляються фахівцями Національного аерокосмічного університету ім. М.Є. Жуковського «ХАІ» [9], однак специфіка нелінійних похибок глибоких нейромереж часто залишається поза увагою.

Таким чином, огляд праць українських науковців щодо задач інтеграції комп'ютерного зору в системи керування показав, що спостерігається певна неузгодженість підходів, характерна як для вітчизняної, так і для світової наукової думки, що полягає в наступному:

- Фахівці в галузі інформаційних технологій зосереджуються на архітектурі мереж та їх апаратному розгортанні, фокусуючись переважно на максимізації показників швидкодії (FPS) та зменшенні розміру моделі. Питання про те, як саме шум стисненої YOLO-мережі вплине на поведінку ПІД-регулятора, зазвичай ігнорується.

- Фахівці в галузі автоматичного керування розробляють робастні системи (LQR, MPC), найчастіше приймаючи відеодатчик як класичну ланку із детермінованим запізненням та білим гауссівським шумом, що може не відповідати реальній стохастичній природі нейромережевого інференсу.

Визначена ізольованість науковців різних галузей показала нагальну потребу у проведенні міждисциплінарних (Co-design) досліджень, здатних інтегрувати параметри компресії нейромереж безпосередньо в рівняння динаміки керованих електромеханічних об'єктів.

**Недосліджені прогалини.** Проведений аналіз наукових джерел виявив низку невирішених проблем у процесі інтеграції нейромереж на Edge-пристроях, які гальмують ефективне впровадження комп'ютерного зору у контури зворотного зв'язку:

- **Брак міждисциплінарних (Co-design) метрик оптимізації.** Досі немає комплексної функції втрат, яка б під час стиснення мережі враховувала динаміку фізичного об'єкта та мінімізувала інтегральну квадратичну похибку (ISE) системи керування.

- **Запит на методологію аналізу стійкості систем із модулем комп'ютерного зору.** Класичні методи теорії керування не адаптовані до специфіки впровадження TinyML, оскільки вони не дозволяють комплексно оцінити спільний дестабілізуючий вплив змінної затримки інференсу  $\tau(t)$  та випадкового шуму квантування  $w(t)$  на контур зворотного зв'язку.

- **Дефіцит експериментальних даних щодо стійкості.** У літературі бракує кількісних оцінок того, як послідовне проріджування мережі на фізичних стендах змінює запаси стійкості системи керування по фазі та амплітуді.

- **Відсутність інженерних методик для розробників.** Існує нагальна потреба в математично обґрунтованих критеріях. Інженерам потрібен інструмент, щоб чітко визначати гранично допустимий ступінь стиснення мережі, за якого об'єкт не втратить керованість.

**Завдання комплексного експериментального дослідження.** Для вирішення вищезазначених проблем з урахуванням необхідності компромісу між затримкою і точністю у процесі інтеграції нейромереж на Edge-пристроях сформульовані постановки поетапних завдань комплексного експериментального дослідження. Спираючись на сучасні практики розробки кіберфізичних систем, запропонована багаторівнева методологія передбачає послідовний перехід від створення ідеалізованих цифрових двійників до напівнатурного (Hardware-in-the-loop, HIL) та натурального моделювання. Цей процес складається з наступних шести завдань (Рис. 1):

**Завдання 1: Створення цифрового двійника (фізична та візуальна модель).**

- Розробка в САПР (CAD) точної 3D-моделі об'єкта (наприклад, зворотного маятника чи мобільної платформи).
- Імпортування 3D-моделі об'єкта у середовища фото та відео реалістичної симуляції (Unity або NVIDIA Isaac Sim) та підключенням фізичного рушія (наприклад MuJoCo для середовища Unity).

**Мета завдання** - забезпечити адекватну динаміку твердих тіл і високоякісний рендер сцени.

**Завдання 2: Синтез ідеального керування.**

- Побудова класичної системи керування (ПД, LQR) із використанням "ідеальних" віртуальних датчиків симулятора.

**Мета завдання** - отримати значення еталонних параметрів (Ground Truth) перехідних процесів оскільки "ідеальні" віртуальні датчики миттєво і без шумів видають точну позицію, швидкість та прискорення.

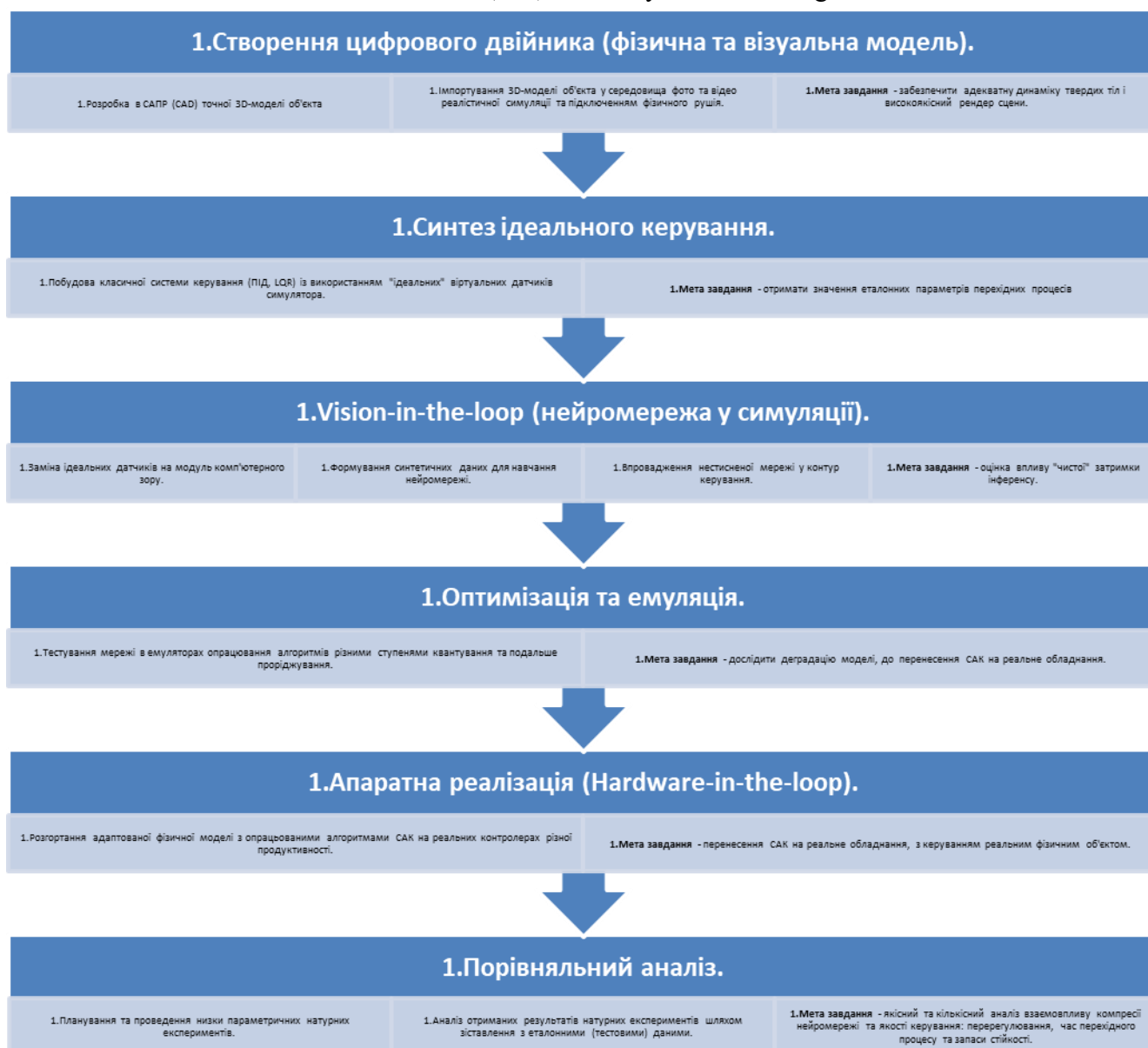


Рисунок 1 - Блок-схема пропонованої багаторівневої методології - комплексного експериментального дослідження

**Завдання 3: Vision-in-the-loop (нейромережа у симуляції).**

- Заміна ідеальних датчиків на модуль комп'ютерного зору.
- Формування синтетичних даних для навчання нейромережі.
- Впровадження нестисненої мережі (FP32) у контур керування.

**Мета завдання** - оцінка впливу "чистої" затримки інференсу.

**Завдання 4: Оптимізація та емуляція (TinyML).**

- Тестування мережі з використанням емуляторів (наприклад QEMU або Renode): опрацювання алгоритмів різними ступенями квантування та подальше проріджування.

**Мета завдання** - дослідити деградацію моделі, до перенесення САК на реальне обладнання.

**Завдання 5: Апаратна реалізація (Hardware-in-the-loop).**

- Розгортання (впровадження) адаптованої фізичної моделі з опрацьованими алгоритмами САК на реальних контролерах різної продуктивності: мікроконтролерах (STM32), одноплатниках (Raspberry Pi) або тензорних обчислювачах (NVIDIA Jetson).

**Мета завдання** - перенесення САК на реальне обладнання, з керуванням реальним фізичним об'єктом.

**Завдання 6: Порівняльний аналіз.**

- Планування та проведення низки параметричних натурних експериментів.

- Аналіз отриманих результатів натурних експериментів шляхом зіставлення з еталонними (тестовими) даними (із Завдання 2).

**Мета завдання** - якісний та кількісний аналіз взаємовпливу компресії нейромережі та якості керування: перерегулювання, час перехідного процесу та запаси стійкості.

**Висновки.** Проведений аналіз дозволяє припустити, що підвищення ефективності вбудованих систем керування з модулем комп'ютерного зору є комплексною задачею, що потребує міждисциплінарного підходу. Традиційні методи ізольованої оптимізації нейромереж наразі стикаються з певними обмеженнями, оскільки підвищення швидкості інференсу задля розгортання моделей на вбудованих системах, без урахування динамічних характеристик об'єкта, може призводити до небажаних ефектів у контурі керування.

Окреслений у роботі запит на новий підхід вказує на потенціал зближення підходів Data Science та теорії автоматичного керування. Це дозволить більш глибоко дослідити взаємозв'язок між параметрами апаратної компресії (TinyML) та показниками якості керування, такими як перерегулювання та час перехідного процесу.

Сформульовані постановки послідовних завдань комплексного експериментального дослідження, що охоплюють етапи від моделювання в Unity/Isaac Sim до HiL-тестування на платформах NVIDIA Jetson та STM32, та становлять основу для подальшого розвитку визначеної проблеми підвищення ефективності вбудованих систем керування з модулем комп'ютерного зору.

У перспективі реалізація послідовних завдань комплексного експериментального дослідження спрямована на розвиток математичної моделі контуру керування САК із врахуванням впливу змінної затримки та шуму квантування для подальшого формулювання обґрунтованих рекомендацій з підвищення сукупної ефективності сучасних автономних систем.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Designing Object Detection Models for TinyML: Foundations, Comparative Analysis, Challenges, and Emerging Solutions / C. El Zeinaty, W. Hamidouche, G. Herrou, D. Menard. *ACM Computing Surveys*. 2024. Vol. 56. P. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1145/3744339>.
2. Jiang B., Chen J., Liu Y. Single-shot pruning and quantization for hardware-friendly neural network acceleration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2023. Vol. 126, Part B. 106816. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106816>.

3. Park J., Kim P., Ko D. Real-time open-vocabulary perception for mobile robots on edge devices: a systematic analysis of the accuracy-latency trade-off. *Frontiers in Robotics and AI*. 2025. Vol. 12. 1693988. DOI: <https://doi.org/10.3389/frobt.2025.1693988>.
4. Robustifying the Deployment of tinyML Models for Autonomous Mini-Vehicles / M. de Prado, M. Rusci, A. Capotondi et al. *Sensors*. 2021. Vol. 21, no. 4. 1339. DOI: <https://doi.org/10.3390/s21041339>.
5. Alaklabi S., Alharbi S. DRL-TinyEdge: Energy- and Latency-Aware Deep Reinforcement Learning for Adaptive TinyML at the 6G Edge. *Future Internet*. 2026. Vol. 18, no. 1. 31. DOI: <https://doi.org/10.3390/fi18010031>.
6. McKee C. Design, Embedded Implementation, and Performance Optimization of a Real-Time AI-Driven Vision Inspection System for Automated Industrial Quality Control: Technical Report. 2025.
7. Розпізнавання та моніторинг водних об'єктів на оптичних супутникових зображеннях із використанням машинного навчання / В. Каштан, В. Гнатушенко, І. Удовик, О. Шевцова. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*. 2023. Вип. 3. С. 32–42. DOI: <https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-4>.
8. Особливості моделювання та побудови інформаційної системи дистанційного моніторингу технічного стану транспортних засобів / І. В. Худяков, І. В. Грицук, В. В. Черненко та ін. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2021. № 2 (14). С. 140–148. DOI: <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-140-148>.
9. Берднікова А. Л., Манжос Ю. С. Інформаційна технологія моделювання складних систем. *Системи обробки інформації*. 2012. Вип. 3 (101), т. 2. С. 2–7.
10. Аналіз алгоритмів стиснення зображень із втратами / О. О. Кавка, В. П. Майда-нюк, О.Н. Романюк, Є.К. Завальнюк. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2023. № 3. С. 59–64. DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-58-3-59-64>.

#### REFERENCES

1. El Zeinaty, C., Hamidouche, W., Herrou, G., & Menard, D. (2024). Designing object detection models for TinyML: Foundations, comparative analysis, challenges, and emerging solutions. *ACM Computing Surveys*, 56(8), 1–46. <https://doi.org/10.1145/3744339>
2. Jiang, B., Chen, J., & Liu, Y. (2023). Single-shot pruning and quantization for hardware-friendly neural network acceleration. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 126(Part B), Article 106816. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.106816>
3. Park, J., Kim, P., & Ko, D. (2025). Real-time open-vocabulary perception for mobile robots on edge devices: A systematic analysis of the accuracy-latency trade-off. *Frontiers in Robotics and AI*, 12, Article 1693988. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3389/frobt.2025.1693988>
4. de Prado, M., Rusci, M., Capotondi, A., Donze, R., Benini, L., & Pazos, N. (2021). Robustifying the deployment of tinyML models for autonomous mini-vehicles. *Sensors*, 21(4), Article 1339. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/s21041339>

5. Alaklabi, S., & Alharbi, S. (2026). DRL-TinyEdge: Energy- and latency-aware deep reinforcement learning for adaptive TinyML at the 6G edge. *Future Internet*, 18(1), Article 31. <https://www.google.com/search?q=https://doi.org/10.3390/fi18010031>
6. McKee, C. (2025). *Design, embedded implementation, and performance optimization of a real-time AI-driven vision inspection system for automated industrial quality control* [Technical report].
7. Kashtan, V., Hnatushenko, V., Udovik, I., & Shevtsova, O. (2023). Rozpiznavannia ta monitorynh vodnykh ob'ektiv na optychnykh suputnykovykh zobrazhenniakh iz vykorystanniam mashynnoho navchannia [Recognition and monitoring of water objects on optical satellite images using machine learning]. *Information Technology: Computer Science, Software Engineering and Cyber Security*, 3, 32–42. <https://doi.org/10.32782/IT/2023-3-4>
8. Khudiakov, I. V., Gritsuk, I. V., Chernenko, V. V., Gritsuk, Y. V., Pohorletskyi, D. S., Makarova, T. V., & Manzhelei, V. S. (2021). Osoblyvosti modeliuвання ta pobudovy informatsiinoi systemy dystantsiinoho monitorynhu tekhnichnoho stanu transportnykh zasobiv [Features of modeling and construction of the information system of remote monitoring of the technical condition of vehicles]. *Visnyk mashynobuduvannia ta transportu* [*Herald of Mechanical Engineering and Transport*], 14(2), 140–148. <https://doi.org/10.31649/2413-4503-2021-14-2-140-148>
9. Berdnikova, A. L., & Manzhos, Y. S. (2012). Informatsiina tekhnolohiia modeliuвання skladnykh system [Information technology for modeling of complex systems]. *Systemy obrobky informatsii* [*Information Processing Systems*], 101(3), 2–7.
10. Kavka, O. O., Maidaniuk, V. P., Romanyuk, O. N., & Zavalniuk, Y. K. (2023). Analiz alhorytmiv stysnennia zobrazhen iz vtratamy [Analysis of the lossy image compression algorithms]. *Informatsiini tekhnolohii ta kompiuterna inzheneriia* [*Information Technologies and Computer Engineering*], 58(3), 59–64. <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2023-58-3-59-64>

Received 17.04.2026.  
Accepted 22.04.2026.  
Published 30.04.2026

### ***Issues of improving the efficiency of embedded control systems with a computer vision module***

*The development of autonomous robotics, UAVs, and Industry 4.0 requires expanding the sensory capabilities of cyber-physical systems through the implementation of computer vision (CV) modules on edge devices [1, 2]. The transfer of CV algorithms is implemented via Edge Computing and TinyML paradigms, utilizing spatio-temporal optimization techniques such as quantization (transition from FP32 to INT8/INT4) and synaptic pruning [3, 4].*

*Global studies indicate that any compression requires a trade-off between accuracy and latency, and also makes models less robust to external disturbances [5]. Domestic scientists have significant achievements in the fields of machine learning, monitoring, and image compression; however, these issues are primarily considered in the context of offline analysis or data transmission [6, 7].*

*In the scientific community, there is an inconsistency of approaches: Data Science specialists evaluate models in isolation using static metrics and ignore the impact of compressed network noise on the control system [8]. Meanwhile, automatic control specialists perceive the video sensor as a classic link with deterministic delay, which may not correspond to the stochastic nature of inference [9].*

*Finding the optimal trade-off between the computational efficiency of the neural network (inference latency) and the performance quality of the automatic control system itself to achieve maximum reliability and efficiency of autonomous devices.*

*Integrating modern computer vision algorithms into resource-limited edge devices leads to a fundamental contradiction.*

*In classical automatic control theory, a video sensor acts as a dynamic link of pure delay, which creates a phase lag and linearly reduces the system's phase stability margin [10]. Exceeding the delay limit inevitably leads to a loss of controllability of the object. To avoid this, developers use aggressive compression to reduce inference time, which restores the phase margin but distorts error statistics [11]. Specifically, bit-depth reduction generates quantization noise (high-frequency jitter), which acts extremely destructively on the differential component of the regulator and causes chaotic oscillations of the actuators [12].*

*Since classic optimization metrics are not suitable for such cases, the authors propose a comprehensive multi-level methodology (Co-design) that allows integrating compression parameters into the dynamic's equations. It encompasses six sequential tasks: creating a digital twin using the MuJoCo physics engine in Unity or NVIDIA Isaac Sim environments [13, 14]; synthesis of ideal control to obtain reference data; Vision-in-the-loop simulation with an uncompressed network; optimization and emulation in QEMU/Renode for TinyML testing [15]; hardware implementation of Hardware-in-the-loop on Nvidia Jetson/Raspberry Pi/STM32 controllers; and a final comparative analysis of the impact of compression on overshoot and stability margins.*

*The conducted analysis suggests that increasing the efficiency of embedded ACS with computer vision is a complex interdisciplinary task. Optimizing neural networks solely by machine learning metrics, without considering the physical object's dynamics, is not effective and can destabilize the control loop.*

*The proposed approach, which combines Data Science and control theory methods (from simulation to HIL testing), creates a solid foundation for researching the relationship between hardware compression parameters and control quality indicators. In the future, its implementation will help develop more accurate mathematical descriptions of the control loop, considering variable delay and quantization noise, as well as formulate clear engineering recommendations for developers of autonomous systems.*

*Keywords: computer vision, embedded systems, automatic control, TinyML, neural network compression, stability margin, hardware-oriented optimization.*

**Гусєв Артем Юрійович** - аспірант кафедри КБКІТ, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-3846-6204>

**Клим Вікторія Юрїївна** - канд. наук, доц., Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5887-1955>

**Husiev Artem** - PhD student at the Department of Cybersecurity and Computer-Integrated Technologies, Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0002-3846-6204>

**Klym Viktoriia** - cand. sc., assoc. prof., Oles Honchar Dnipro National University.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-5887-1955>

## СЕГМЕНТАЦІЯ ЗОБРАЖЕНЬ З УРАХУВАННЯМ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ЗА ДОПОМОГОЮ АРХІТЕКТУРИ U-NET І MONTE CARLO DROPOUT

*Анотація.* Історично згорткові нейронні мережі набули поширення для вирішення задач розпізнавання об'єктів на зображеннях, зокрема для попереднього аналізу пошкоджень після стихійних явищ. Архітектура U-Net стала одним із популярних рішень для сегментації зображень; за останні роки з'явилося багато досліджень і модифікацій даної моделі, що використовують як механізми уваги, так і окремі модулі для покращення результатів класифікації. Водночас дослідження оцінки невизначеності й пояснення роботи сегментаційних моделей все ще потребують поглиблення, чим і зумовлена актуальність даної роботи.

Хоча підвищення точності й ефективності є важливою складовою будь-якої моделі, в таких задачах як попередній аналіз пошкоджень і збитків оцінка впевненості, або невизначеності, є одним із вирішальних факторів, оскільки може бути використана для подальшого прийняття рішень. Мета дослідження полягає у побудові сегментаційної моделі модифікованої архітектури U-Net з модулем ASPP з урахуванням невизначеності шляхом множинного запуску моделі з різними масками відсіювання (Monte Carlo Dropout) для попереднього аналізу пошкоджених будівель на зображеннях.

В роботі представлено дослідження модифікованої архітектури U-Net із заміною bottleneck на модуль ASPP та застосуванням Monte Carlo Dropout. На основі розрахункових формул дисперсії, ентропії та взаємної інформації сформовано карти невизначеності, що застосовано для покращення сегментації. Показано, що ASPP підвищує точність визначення форм об'єктів, а комбінована функція втрат сприяє покращенню сегментації. У експериментах досягнуто приросту 3.8% середнього IoU, 4% для вцілілих і 5.3% для зруйнованих будівель. Маски невизначеності проаналізовано та використано в методі з двома пороговими значеннями впевненості й невизначеності моделі для виділення найбільш надійних ділянок. Для практичного впровадження описаних методів і підходів існує необхідність їх подальшого дослідження.

*Ключові слова:* розпізнавання пошкоджених будівель, згорткові нейронні мережі, комп'ютерний зір, семантична сегментація, Monte Carlo Dropout, ASPP, U-Net, Google Earth.

**Постановка проблеми.** Щороку природні явища як повені та урагани призводять до критичних руйнувань на значних територіях. Водночас, довготривалі військові дії носять ще масштабніший характер, що унеможлиблює швидке післявоєнне відновлення без автоматизованих технологій оцінки завданих збитків. Своєчасне виявлення пош-

кожденої цивільної та промислової інфраструктури дозволяє не лише пришвидшити процес, але й зменшити навантаження на логістичні центри, виявити найбільш критичні ділянки.

Останні дослідження відображають широке застосування згорткових нейронних мереж для оцінки ушкоджень після природних явищ та інших катастроф [1, 2]. Такі архітектури як YOLO, ResNet і U-Net показують високу ефективність в задачах виявлення об'єктів, а також сегментації зображень. U-Net, що історично застосовується для сегментації у медицині, використовується як самостійна модель, так і у якості окремого компонента у більших системах [3, 4].

Семантична сегментація є ключовим підходом машинного зору для оцінки руйнувань, оскільки існує необхідність визначення об'єктів у межах пікселів. Це дозволяє не лише отримувати приблизне розташування об'єкту, але й його неоднозначну структуру й характерні пошкодження. За останні роки набули широкого поширення модифікації U-Net, які використовують механізми уваги для визначення багатомасштабних ознак [5], так і окремі модулі, наприклад, просторово-пірамідального пулінгу (з англ. Atrous Spatial Pyramid Pooling, ASPP) [6], що підвищують точність сегментації.

Водночас, незважаючи на значні дослідження точності й ефективності як розпізнавання об'єктів, так і сегментації зображень, вони переважно зосереджені на кількісних показниках якості, залишаючи поза увагою оцінку невизначеності передбачень. Впевненість моделі є важливою складовою у даному випадку, оскільки надає додаткову інформацію, яка може бути використана для підвищення надійності прийняття рішень. Зокрема, аналіз невизначеності дозволяє виявляти області з потенційно помилковою сегментацією. Крім того, така інформація може бути використана для адаптивного вдосконалення моделі, наприклад, шляхом донавчання на найбільш проблемних зразках або оптимізації архітектурних рішень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Оцінка невизначеності прогнозування для сегментаційних моделей є доволі складною, але важливою задачею, особливо для застосування у реальних умовах. Не лише через необхідність прогнозів із високою достовірністю, але й через можливість отримати потужний інструмент для пояснення і подальшого покращення роботи моделі. У контексті глибокого навчання розрізняють два основних типи невизначеності: алеаторну (статистичну), що пов'язана з внутрішньою варіативністю і шумами у даних (наприклад, низька якість зображень або неоднорідні межі об'єкту), й епістемічну, яка зумовлена обмеженістю знань самої моделі. В свою чергу, остання може бути зменшена шляхом покращення моделі, знаходження оптимальних параметрів, або розширення існуючих даних.

В різних наукових працях можна відмітити декілька основних підходів [7, 8, 9], наприклад, дослідження каліброваних показників достовірності (вихідні ймовірності з останнього шару моделі) на відповідність їх справжній ймовірності правильності, або зосередження на моделюванні невизначеності моделі, які зазвичай натхненні байєсівськими принципами, і включають метод Monte Carlo Dropout, запропонований Gal і

Ghahramani (2016), або глибокі ансамблі, що використовують для оцінки невизначеності набір прогнозів, від Lakshminarayanan, Pritzel і Blundell (2017).

Зважаючи на поширеність архітектури U-Net, в інших дослідженнях приділяється увага поєднанню цієї моделі з підходами активного навчання і баєсівського виведення для сегментації зображень з оцінкою невизначеності [10, 11]. Автори зазначають про достатню ефективність і стабільність сегментації навіть при обмежених даних, а також підтверджують доцільність використання невизначеності для подальшого підвищення ефективності моделей.

Загалом варто відзначити активні дослідження методів оцінки невизначеності й калібрації моделей, водночас наявні праці оцінки невизначеності для сегментаційних моделей досі обмежені, в тому числі, що розглядають попіксельні метрики й локальний просторовий аналіз. Таким чином, актуальність зумовлена необхідністю дослідження підходів і моделей, що поєднують достатню точність сегментації з можливістю кількісної оцінки невизначеності, що особливо корисно у випадках виявлення пошкоджених об'єктів при щільній забудові або зарослій місцевості.

**Мета дослідження.** Метою роботи є побудова модифікованої моделі архітектури U-Net семантичної сегментації з урахуванням невизначеності з використанням Monte Carlo Dropout (далі MCD) для попереднього аналізу пошкоджених будівель на зображеннях й визначення неоднозначних регіонів, що в подальшому може бути використано для покращення точності сегментації.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** У даній роботі розглядається модифікація класичної архітектури U-Net, де замість найвужчого місця у мережі використовується окремий модуль ASPP [6]. Архітектура передбачає дві основні складові: стискаючий і розширюючий шляхи, які забезпечують виділення ознак, та відповідно сегментацію зображення на кінцевому шляху, що нагадує принцип роботи моделей типу кодер-декодер. Логіку даних складових можна розбити на блоки, які відповідають за окремі функції: згорткові блоки, що являють собою послідовності згортки розміром  $3 \times 3$  із функціями активації; блоки кодера, які формують стискаючий шлях і поєднують згорткові блоки з операціями підвибірки ( $2 \times 2$  пулінг) та застосуванням dropout; а також блоки декодера, що виконують зворотне просторове відновлення за допомогою апсемплінгу, конкатенації відповідних ознак із кодера й використання dropout в кінці.

В свою чергу, найвужче місце у мережі поєднує дві частини моделі, що містить найбільшу кількість каналів зі зменшеною просторовою роздільною здатністю, що дозволяє акумулювати найбільш узагальнене представлення вхідних даних. Хоча класична архітектура є достатньо ефективною, окремий модуль ASPP може позитивно впливати на точність сегментації.

Модуль складається із декількох пулінгових шарів, що мають не суцільні фільтри, а з деякими відстанями між ними, що застосовуються послідовно. Це дозволяє вилучити необхідні ознаки за різної масштабованості без підвищення складності розрахунків, оскільки враховуються лише ненульові значення фільтрів.

В кінці модуля розташовані пулінгові шари, та відповідний шар, що поєднує усі попередні в один, після чого відбувається згортка до відповідного розміру. Дані з мо-

дуля ASPP подаються до другої частини моделі, яка має аналогічну будову до класичної, після чого генерується сегментаційна маска, яка є результатом роботи побудованої моделі. Загальна будова наведена на рис. 1.

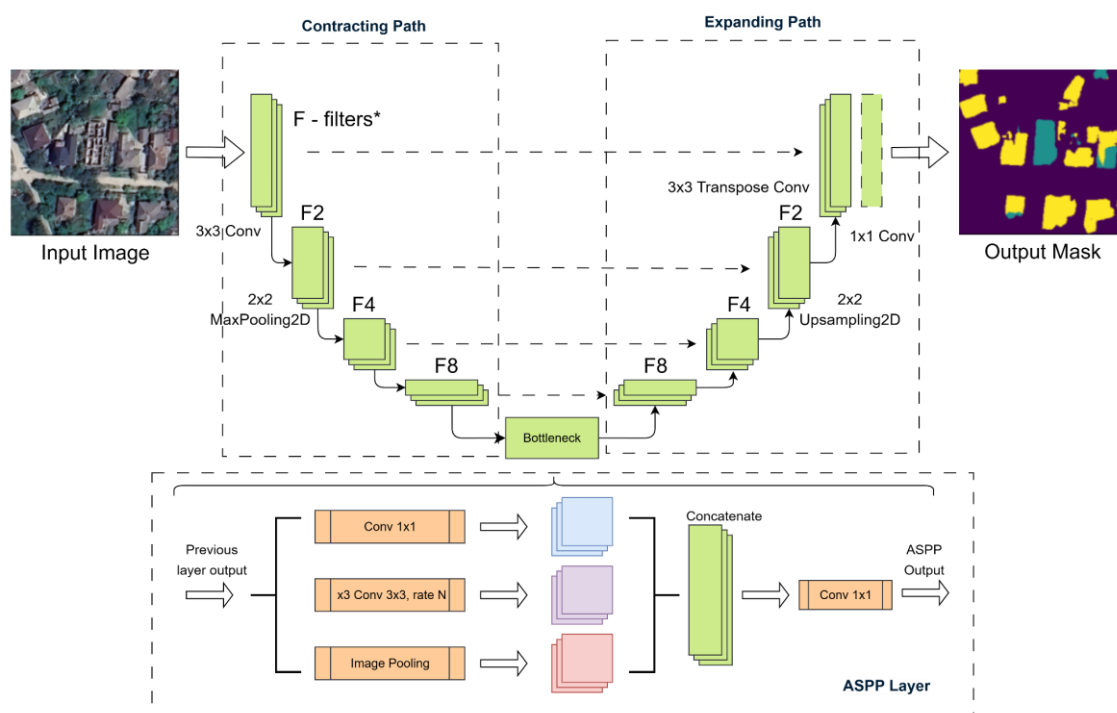


Рисунок 1 - Архітектура моделі згорткової U-Net з модулем ASPP

**Monte Carlo Dropout.** Даний метод є поширеним для оцінки невизначеності в глибоких мережах через простоту його реалізації, коли необхідно отримати оцінювання варіативності передбачень. Gal і Ghahramani у своїй праці [7] пояснюють теоретичну основу MCD, який передбачає використання dropout у навчанні нейронних мереж як наближеного байєсівського висновку в глибоких гаусових процесах. У межах підходу модель розглядається як сукупність стохастичних підмереж, тобто, замість одного результату отримується розподіл можливих вихідних даних.

Застосування MCD передбачає активацію dropout не лише під час навчання, а власне й на етапі висновку (інференсу). Для кожного вхідного зразку виконується декілька стохастичних проходів через мережу з різними dropout, в результаті чого формується набір передбачень (рис. 2), на основі якого обчислюються різні статистичні характеристики: середнє, дисперсія, ентропія тощо. Таким чином MCD дозволяє отримати усереднений прогноз на основі декількох результатів, а також кількісно оцінити невизначеність моделі.

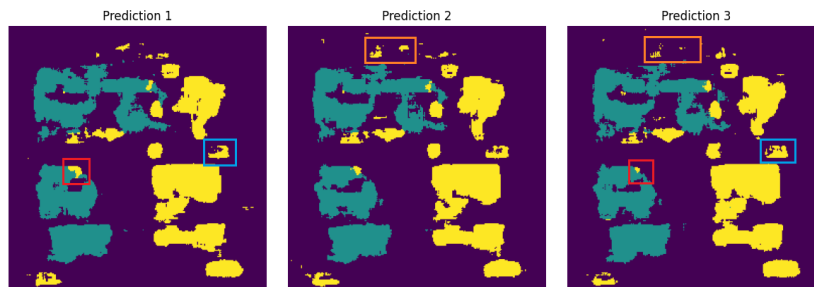


Рисунок 2 - Різні вихідні зображення мережі (кольорами обведені деякі відмінності між сегментаційними масками завдяки різним маскам dropout)

Отримані оцінки невизначеності можуть бути використані для побудови окремих сегментаційних масок, які піпкельно відображають регіони, які модель визначає з більшою або меншою впевненістю, які в свою чергу можуть бути застосовані для підвищення якості як набору даних (виявлення проблематичних ділянок для сегментації), так і модифікації самої моделі. Також результати MCD можна застосовувати для повторної сегментації зображень на основі отриманої інформації про впевненість моделі.

**Набір даних і попередня обробка.** В рамках дослідження було використано власний невеликий набір даних, що містить 100 зображень 512 на 512 пікселів міста Маріуполь (джерело Google Earth), зроблених у 2022 року. Усі зображення загалом містять близько 2500 унікальних будівель, які поділені на 2 класи: зруйновані та вцілілі. Враховуючи специфіку руйнувань, які неможливо повністю оцінити у виду зверху, до вцілілих будівель було віднесено усі можливі, для яких чітко не відслідковуються зовнішні пошкодження. Приклад деяких зображень наведено на рис. 3.

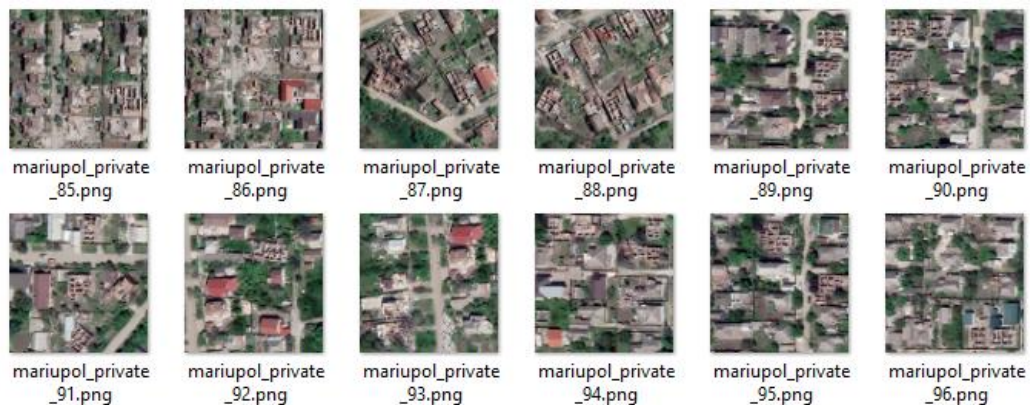


Рисунок 3 - Приклад зображень набору даних

Враховуючи задній фон (або бекграунд), набір даних містить 3 класи, які будуть враховуватися під час навчання, а також крім оригінальних зображень, у наборі присутні відповідні сегментаційні і вагові маски, які застосовуються для балансування класів будівель і заднього фону.

Для розширення варіативності набору на етапі попередньої обробки до зображень застосовуються прості перетворення: повороти, віддзеркалення, зсуви, а також обме-

жене масштабування. Таким чином, набір даних було збільшено у декілька разів (в дослідження розглядаються різні конфігурації).

**Застосовані метрики і оцінка невизначеності.** Для семантичної сегментації найчастіше використовується функція втрат категоріальна перехресна ентропія (англ. Categorical Cross Entropy, CCE), яка обчислює “відстань” між фактичним розподілом і відповідним прогнозом. Нижча оцінка визначає кращий ступінь узгодженості, відповідно, вища вказує на розбіжності. Формула (1) для CCE наведена нижче:

$$CCE = -\sum_{c=1}^k \text{ground\_truth}_c \times \log(\text{image}_c), \quad (1)$$

де  $c$  – поточний клас у діапазоні від 1 до  $k$ ,  $\text{image}$  – вихідні дані (зображення),  $\text{ground\_truth}$  – сегментаційна маска відповідного зображення.

Також було використано узагальнену функцію втрат, яка враховує комбінацію втрат CCE та Dice Loss (2), що максимізує перекриття між прогнозованою й цільовою сегментаційними масками:

$$Dice_{loss} = 1 - \frac{2\sum_i g_i p_i}{\sum_i g_i + \sum_i p_i}, \quad (2)$$

де  $g_i$  – оригінальна сегментаційна маска,  $p_i$  – прогнозована сегментаційна маска.

У дослідженні розглядається використання метрики Intersection over Union (IoU), яка враховує співвідношення кількості пікселів вихідного зображення із відповідною сегментаційною маскою. Реалізована функція враховує середнє IoU (3-4) між усіма класами, а також для основних класів будівель - пошкоджених і вцілілих, що дозволяє отримати повнішу картину про роботу моделі. Розрахункові формули наступні:

$$IoU_c = \frac{TP_c}{TP_c + FP_c + FN_c}, \quad (3)$$

де  $c$  – поточний клас для розрахунку,  $TP$  – «істинно позитивне» значення,  $FP$  – «хибно-позитивне» значення,  $FN$  – «хибнонегативне» значення пікселів.

$$IoU_{mean} = \frac{1}{C_{max}} \sum_c IoU_c, \quad (4)$$

де  $c$  – поточний клас для обчислення,  $C_{max}$  – загальна кількість класів,  $IoU_c$  – розраховане значення IoU для класу  $c$ .

Для оцінки невизначеності було розраховано дисперсію (5), прогностичну ентропію (6) і взаємну інформацію (7), які набули широкого поширення у моделях, що використовують MCD. Дисперсія вимірює розсіювання прогнозованих ймовірностей класів за набором стохастичних проходів, ентропія фіксує загальну невизначеність усередненого прогнозу на наборі результатів, що були отримані під час проходжень, а взаємна інформація ізолює епістемічну невизначеність шляхом кількісної оцінки розбіжностей між окремими прогнозами й середнім значенням [7]. Узагальнені формули виглядають наступним чином:

$$Var = \frac{1}{T} \sum (p_t^c - m^c)^2, \quad (5)$$

де  $p_t^c$  – ймовірність для відповідного класу на проходженні  $t$ ,  $m^c$  – середня ймовірність,  $T$  – кількість проходжень.

$$H = - \sum_{c=1}^C p^c \log p^c, \quad (6)$$

де  $p^c$  – розрахована середня ймовірність для класу  $c$ .

$$MI = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (- \sum_{c=1}^C p_t^c \log p_t^c), \quad (7)$$

де  $p^c$  – розрахована середня ймовірність для класу  $c$ .

**Результати тренування і тестування моделі.** Початкова побудована модель мала наступні параметри: кількість фільтрів – 32, dropout – 0.2, фільтри ASPP = {1, 3, 6, 9}, збільшення набору даних у 5 разів. Набір даних було розділено наступним чином: 70% - вибірка для тренування, 15% – вибірка для оцінки на етапі навчання, а також 15% унікальних зображень для тестування моделі на абсолютно нових для неї даних. На рисунку 4 наведено одне із сегментованих зображень.

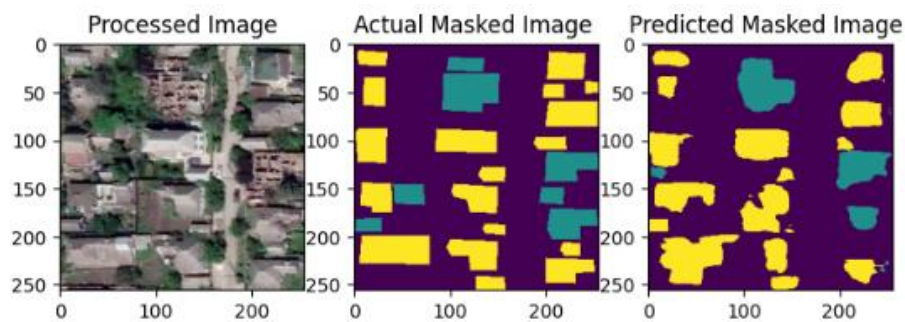


Рисунок 4 – Приклад сегментації зображення базовою моделлю: оригінальне зображення, ідеальна сегментація і вихідне зображення

Було проведено декілька експериментів із різними параметрами моделі й набору даних, найкращі результати з усіх епох навчання занесені у табл. 1.

Згідно проведених досліджень впливає позитивний вплив використаної комбінованої функції втрати, що враховує як CSE, так і Dice Loss. Також невелике збільшення Dropout обмежено покращує сегментацію, що можна побачити по відповідним метрикам IoU. Порівнюючи найкращі моделі з базовою, вдалося досягти приросту 3.8% середнього IoU, 4% IoU вцілілих будівель, а також 5.3% для зруйнованих.

Модуль ASPP має незначний позитивний вплив на точність сегментації і дозволяє отримувати більш рівномірні краї об'єктів. Водночас збільшення кількості фільтрів сповільнює процес навчання і погіршує точність сегментації з аналогічними параметрами. Але варто відзначити потенційно позитивну динаміку при збільшенні Dropout і кількості епох, що врівноважує модель і сповільнює перенавчання з часом.

В рамках експерименту було побудовано різні маски невизначеності (рис. 5) на основі відповідних формул (5-7), у даному випадку порядок наступний: на основі прогностичної ентропії, дисперсії та взаємної інформації. Як можна побачити, кожен метод має власні особливості розрахунків, а отже й відображення усереднених невизначеностей навіть для одного й того ж зображення.

Порівняльна таблиця побудованих моделей з розрахованими метриками

Функція втрат	Інші параметри	Loss		IoU aged		IoU Intact		IoU Mean	
		Val	Test	Val	Test	Val	Test	Val	Test
CCE	Базова модель	0.275	<b>0.269</b>	0.415	<b>0.395</b>	0.418	<b>0.406</b>	0.546	<b>0.539</b>
	32 фільтри, 0.2 dropout, 10 аугмент.	0.232	<b>0.224</b>	0.436	<b>0.43</b>	0.42	<b>0.409</b>	0.55	<b>0.546</b>
	32 фільтри, 0.3 dropout, 10 аугмент. *	0.147	<b>0.146</b>	0.462	<b>0.453</b>	0.47	<b>0.45</b>	0.586	<b>0.577</b>
	32 фільтри, 0.4 dropout, 10 аугмент.	0.155	<b>0.153</b>	0.437	<b>0.43</b>	0.436	<b>0.423</b>	0.557	<b>0.553</b>
Combined loss	Базова модель	0.256	<b>0.245</b>	0.41	<b>0.404</b>	0.413	<b>0.427</b>	0.559	<b>0.555</b>
	32 фільтри, 0.2 dropout, 10 аугмент.	0.227	<b>0.221</b>	0.431	<b>0.423</b>	0.42	<b>0.399</b>	0.56	<b>0.552</b>
	32 фільтри, 0.3 dropout, 10 аугмент.	0.204	<b>0.199</b>	0.454	<b>0.448</b>	0.462	<b>0.446</b>	0.582	<b>0.577</b>
	32 фільтри, 0.4 dropout, 10 аугмент. **	0.201	<b>0.196</b>	0.456	<b>0.448</b>	0.459	<b>0.444</b>	0.584	<b>0.577</b>

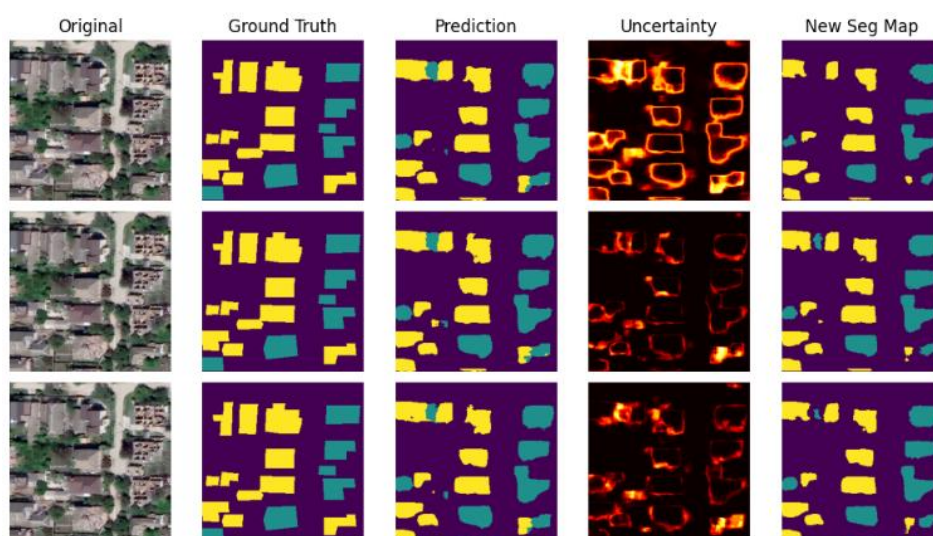


Рисунок 5 – Дослідження різних методів побудови масок невизначеності для сегментаційної моделі на основі MCD

Окремо в рамках дослідження було створено алгоритм генерації нової сегментаційної маски (останнє зображення на рис. 5), який враховував два порогових значення, а саме впевненості моделі у належності кожного пікселя до відповідного класу, а також відповідне значення невизначеності моделі для кожного пікселя на основі побудованої усередненої маски невизначеності. Розраховані чисельні показники вказують як на можливе покращення сегментації, так і її погіршення, в залежності від деяких умов, що можуть включати як особливості самого зображення, так і обраного методу, а також будови й налаштувань самої моделі.

Таким чином можна стверджувати про потенційно позитивний вплив застосованого підходу на основі невизначеності, отриманих за допомогою методу MCD. В свою чергу, для подальшого практичного застосування підходу на практиці, існує необхідність більш глибокого дослідження впливу різних параметрів моделі на сегментацію вихідного зображення, а також розрахункових формул невизначеностей.

**Висновки.** Завдання оцінки пошкоджень і збитків – складний і трудомісткий процес. Сучасні технології і моделі дозволяють автоматизувати визначення об'єктів на зображеннях, так найбільшого поширення набули згорткові нейронні мережі, зокрема архітектура U-Net. Існує багато досліджень модифікації і вдосконалення архітектури U-Net, наприклад, за допомогою механізмів уваги, додаткових модулів або підгонці параметрів моделі, водночас дослідження оцінки невизначеності сегментаційних моделей все ще потребує розвитку.

У статті розглянуто побудову модифікованої архітектури U-Net із модулем ASPP замість bottleneck, а також застосування множинних проходжень із активним дропаутом (MCD) для отримання показників невизначеності. Використовуючи розрахункові формули дисперсії, ентропії та взаємної інформації, були побудовані відповідні сегментаційні маски невизначеності, які були використані для покращення результатів.

Відмічено позитивний вплив модуля ASPP на визначення форми об'єктів на зображеннях, а також застосування комбінованої функції витрат. У ході експерименту вдалося досягти приросту 3.8% середнього IoU, 4% IoU вцілілих будівель, а також 5.3% для зруйнованих будівель у порівнянні з базовою моделлю. Побудовані маски невизначеності були проаналізовані як візуально, так й оцінені кількісно, а також використані в запропонованому методі покращення сегментації, який спирається на застосування двох порогів для попиксельного відображення ділянок із найбільшим рівнем впевненості й низькою невизначеністю. Доцільно продовжити дослідження описаних методів і підходів для подальшого впровадження їх у практику.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Moreno González, C. L., Montoya, G. A., & Lozano Garzón, C. (2025). Toward reliable post-disaster assessment: Advancing building damage detection using You Only Look Once convolutional neural network and satellite imagery. *Mathematics*, 13, 1041. <https://doi.org/10.3390/math13071041>.
2. Liu, J., Luo, Y., Chen, S., Wu, J., & Wang, Y. (2024). BDHE-Net: A novel building damage heterogeneity enhancement network for accurate and efficient post-earthquake assessment using aerial and remote sensing data. *Applied Sciences*, 14, 3964.

<https://doi.org/10.3390/app14103964>.

3. Mazurets, O., Molchanova, M., Shurypa, M., & Sobko, O. (2026). Devising a neural-network method for assessing the condition of destroyed buildings using images from unmanned aerial vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(2(139)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.351605>
4. Deng, L., & Wang, Y. (2022). Post-disaster building damage assessment based on improved U-Net. *Scientific Reports*, 12, 15862. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20114-w>.
5. Yang, Q., Wang, Z., Liu, S., & Li, Z. (2024). Research on improved U-net based remote sensing image segmentation algorithm. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.12672>.
6. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2015). Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 37(9), 1904–1916. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.4729>.
7. Gal, Y., & Ghahramani, Z. (2016). Dropout as a Bayesian approximation: Representing model uncertainty in deep learning. In *Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning* (Vol. 48, pp. 1050–1059). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02142>.
8. Rey, M., Mnih, A., Neumann, M., Overlan, M., & Purves, D. (2025). Uncertainty evaluation of segmentation models for Earth observation. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.19586>.
9. Dechesne, C., Lassalle, P., & Lefèvre, S. (2021). Bayesian U-Net: Estimating uncertainty in semantic segmentation of Earth observation images. *Remote Sensing*, 13(19), 3836. <https://doi.org/10.3390/rs13193836>.
10. Saidu, C., & Csató, L. (2021). Active learning with Bayesian U-Net for efficient semantic image segmentation. *Journal of Imaging*, 7(2), 37. <https://doi.org/10.3390/jimaging7020037>.
11. Saifullah, S., & Dreżewski, R. (2026). Bayesian optimization-driven U-Net architecture tuning for brain tumor segmentation. In *Proceedings of the 6th International Electronic Conference on Applied Sciences* (Eng. Proc., 124(1), 22). <https://doi.org/10.3390/engproc2026124022>.

#### REFERENCES

1. Moreno González, C. L., Montoya, G. A., & Lozano Garzón, C. (2025). Toward reliable post-disaster assessment: Advancing building damage detection using You Only Look Once convolutional neural network and satellite imagery. *Mathematics*, 13, 1041. <https://doi.org/10.3390/math13071041>.
2. Liu, J., Luo, Y., Chen, S., Wu, J., & Wang, Y. (2024). BDHE-Net: A novel building damage heterogeneity enhancement network for accurate and efficient post-earthquake assessment using aerial and remote sensing data. *Applied Sciences*, 14, 3964. <https://doi.org/10.3390/app14103964>.
3. Mazurets, O., Molchanova, M., Shurypa, M., & Sobko, O. (2026). Devising a neural-network method for assessing the condition of destroyed buildings using images from unmanned aerial vehicles. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(2(139)), 6–16. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2026.351605>

4. Deng, L., & Wang, Y. (2022). Post-disaster building damage assessment based on improved U-Net. *Scientific Reports*, 12, 15862. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20114-w>.
5. Yang, Q., Wang, Z., Liu, S., & Li, Z. (2024). Research on improved U-net based remote sensing image segmentation algorithm. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.12672>.
6. He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2015). Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 37(9), 1904–1916. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1406.4729>.
7. Gal, Y., & Ghahramani, Z. (2016). Dropout as a Bayesian approximation: Representing model uncertainty in deep learning. In *Proceedings of the 33rd International Conference on Machine Learning* (Vol. 48, pp. 1050–1059). <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.02142>.
8. Rey, M., Mnih, A., Neumann, M., Overlan, M., & Purves, D. (2025). Uncertainty evaluation of segmentation models for Earth observation. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.19586>.
9. Dechesne, C., Lassalle, P., & Lefèvre, S. (2021). Bayesian U-Net: Estimating uncertainty in semantic segmentation of Earth observation images. *Remote Sensing*, 13(19), 3836. <https://doi.org/10.3390/rs13193836>.
10. Saidu, C., & Csató, L. (2021). Active learning with Bayesian U-Net for efficient semantic image segmentation. *Journal of Imaging*, 7(2), 37. <https://doi.org/10.3390/jimaging7020037>.
11. Saifullah, S., & Dreżewski, R. (2026). Bayesian optimization-driven U-Net architecture tuning for brain tumor segmentation. In *Proceedings of the 6th International Electronic Conference on Applied Sciences (Eng. Proc., 124(1), 22)*. <https://doi.org/10.3390/engproc2026124022>.

Received 17.04.2026.  
Accepted 22.04.2026.  
Published 30.04.2026

### ***Uncertainty-based image segmentation using U-Net architecture and Monte Carlo Dropout***

*Historically, convolutional neural networks have been widely used to solve image object recognition problems, in particular for preliminary damage analysis after natural disasters. The U-Net architecture has become one of the popular solutions for image segmentation; in recent years, many studies and modifications of this model have proposed, using both attention mechanisms and separate modules to improve classification results. At the same time, research into uncertainty assessment and explanation of the operation of segmentation models still need to be deepened, which is why this work is relevant.*

*Although increasing accuracy and efficiency is an important component of any model, in tasks such as preliminary damage and loss analysis, the assessment of confidence, or uncertainty, is one of the decisive factors, since it can be used for further decision-making. The purpose of the study is to build a segmentation model of the modified U-Net architecture with the ASPP module, taking into account uncertainty by multiple runs of the model with different dropout masks (Monte Carlo Dropout) for preliminary analysis of damaged buildings in images.*

*The paper presents a study of the modified U-Net architecture with the replacement of the bottleneck with the ASPP module and the use of Monte Carlo Dropout. Based on the cal-*

*ulation formulas of variance, entropy and mutual information, uncertainty maps were formed, which were used to improve segmentation. It is shown that ASPP increases the accuracy of object shape detection, and the combined loss function contributes to improving segmentation. In the experiments, an increase of 3.8% of the average IoU was achieved, 4% for surviving and 5.3% for destroyed buildings. The uncertainty masks were analyzed and used in the method with two threshold values of confidence and model uncertainty to select the most reliable areas. For the practical implementation of the described methods and approaches, there is a need for their further study.*

*Keywords: damaged building detection, convolutional neural networks, computer vision, semantic segmentation, Monte Carlo Dropout, ASPP, U-Net, Google Earth.*

**Димо Валерій Володимирович** – аспірант кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6024-3018>.

**Гожий Олександр Петрович** – доктор технічних наук, професор кафедри інтелектуальних інформаційних систем Чорноморського національного університету ім. Петра Могили.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3517-580X>.

**Dymo Valerii Volodymyrovych** – postgraduate student of the Department of Intellectual Information Systems of Petro Mohyla Black Sea National University.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-6024-3018>.

**Gozhyj Aleksandr Petrovych** – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Intellectual Information Systems of the Petro Mohyla Black Sea National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3517-580X>.

А.М. Гриценко, А.А. Азарян, С.А. Рубан

## ПРОЕКТУВАННЯ БЕЗПЕЧНОЇ АРХІТЕКТУРИ РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ ЗБОРУ ТА НАКОПИЧЕННЯ ПРОМИСЛОВИХ ДАНИХ НА ПЛАТФОРМІ JAVA

*Анотація.* У статті розглянуто проблему забезпечення цілісності та безпеки технологічних даних у гірничо-видобувній галузі. Метою є проектування захищеної розподіленої Java-архітектури для збору, збереження та обробки даних. Використано методи системного аналізу, моделювання загроз і архітектурного проектування. Запропоновано мікросервісну архітектуру з принципами Security-by-Design, mTLS, RBAC та подієвою взаємодією. Результати демонструють підвищення відмовостійкості завдяки гібридному зберіганню з реплікацією та синхронізацією даних, що забезпечує усунення єдиних точок відмови та інтеграцію в сучасну IT-інфраструктуру.

*Ключові слова:* мікросервісна архітектура, Security-by-Design, розподілені системи, захист даних, відмовостійкість, mTLS, RBAC, подієво-орієнтована архітектура, синхронізація даних.

**Постановка проблеми.** Забезпечення цілісності та доступності технологічних даних є критично важливим для систем автоматизації гірничо-видобувної галузі України. Програмно-апаратний комплекс НАКС-ПК на базі Delphi 7 тривалий час забезпечував оперативний контроль якості руди гамма-гамма методом, однак експлуатація виявила низку архітектурних вразливостей, що створюють ризики для збору, збереження та доступу до даних.

По-перше, існують проблеми безпеки збору даних у середовищі з радіоактивними джерелами (Am-241). Оскільки система належить до радіоізотопних приладів, програмні збої або несанкціоноване втручання можуть призвести не лише до спотворення вимірювань, а й до втрати контролю над джерелом випромінювання. Використання Modbus RTU/TCP без шифрування та автентифікації робить можливими атаки типу «man-in-the-middle», що дозволяє підмінювати дані інтенсивності та навантаження конвеєра, впливаючи на визначення вмісту заліза та роботу обладнання.

По-друге, актуальною є проблема ненадійності накопичення даних і відсутності відмовостійкості. Використання локальних СУБД (Firebird або SQLite) на одному сервері створює «єдину точку відмови». У разі збоїв обладнання, мережі чи аварій у диспетчерській можливе повне безповоротне втрачання оперативних даних за значні періоди. Це є критичним, оскільки похибки у визначенні вмісту заліза можуть призводити до значних фінансових втрат або штрафів, а відсутність резервного відновлення посилює ризики.

По-третє, система не відповідає сучасним вимогам щодо керування доступом і аудиту. Десктоп-додатки мають обмежені можливості ідентифікації користувачів, не підтримують рольову модель доступу (RBAC), не забезпечують централізованого логування та захисту критичних налаштувань. Це створює загрозу несанкціонованих змін і внутрішнього саботажу. Додатково, відсутність кросплатформенності обмежує використання сучасних операційних систем і ускладнює інтеграцію в сучасну ІТ-інфраструктуру підприємства.

Отже, існує потреба у розробці нової програмної архітектури на базі Java з використанням принципів Security-by-Design, яка забезпечить захищений збір даних, відмовостійке збереження в розподілених базах та надійний контроль доступу для користувачів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасна наукова спільнота визначає Security-by-Design (SbD) не як додаткову опцію, а як фундаментальний архітектурний принцип, де безпека закладається на етапі проектування інтерфейсів та моделей авторизації. Згідно з сучасними підходами до програмної інженерії, архітектура системи повинна враховувати нефункціональні вимоги, зокрема безпеку, ще на ранніх етапах розробки [2].

Розвиток мікросервісних архітектур значно вплинув на підходи до побудови розподілених систем, забезпечивши гнучкість, масштабованість та ізоляцію компонентів [3]. У роботах останніх років підкреслюється важливість використання архітектурних патернів для мікросервісів, що дозволяє систематизувати процес проектування складних систем [4].

Питання обробки великих обсягів даних у розподілених системах детально розглянуто у фундаментальних дослідженнях, де визначено основні принципи побудови надійних і масштабованих систем [5]. Зокрема, важливу роль відіграє використання подієво-орієнтованих підходів та брокерів повідомлень, таких як Apache Kafka [6], що отримали подальший розвиток у сучасних потокових платформах [7].

У контексті промислових систем значна увага приділяється безпеці Industrial IoT, де дослідження демонструють зростання кількості кіберзагроз та необхідність комплексного підходу до їх нейтралізації [8]. Додатково питання безпеки та конфіденційності у виробничих системах розглядаються у контексті концепції smart manufacturing [9].

Основним стандартом для проектування безпечних промислових систем є ІЕС 62443, який визначає принципи сегментації та рівні безпеки [10; 11]. У свою чергу, сучасні криптографічні протоколи, такі як TLS 1.3 [12] та механізми авторизації OAuth 2.0 [13], забезпечують захист каналів зв'язку та контроль доступу. Додатково рекомендації NIST щодо цифрової ідентифікації [14] визначають вимоги до управління автентифікацією в розподілених системах.

Питання організації безперервної доставки програмного забезпечення та автоматизації процесів розгортання також є важливими для сучасних систем [15]. У контексті синхронізації даних у розподілених середовищах використовуються спеціалізовані інструменти, зокрема SymmetricDS [16].

Окрему увагу слід приділити прикладним дослідженням у галузі контролю якості руди, де доведено ефективність використання гамма-випромінювання для оперативного визначення характеристик сировини [1].

**Мета дослідження.** Метою статті є проектування безпечної розподіленої архітектури системи контролю якості руди на платформі Java, яка за рахунок використання мікросервісного підходу, протоколів взаємної автентифікації (mTLS) та механізму гібридного дублювання баз даних забезпечує захищений збір, надійне накопичення та регламентований доступ до технологічної інформації.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Проектування архітектури нової системи базується на парадигмі Security-by-Design, що передбачає інтеграцію механізмів захисту як невід’ємних компонентів програмної структури, а не як зовнішніх надбудов. Такий підхід науково обґрунтований тим, що усунення архітектурних вразливостей на етапі дизайну є на порядок економічно ефективнішим порівняно з виправленням дефектів у вже розгорнутій системі.

Для досягнення цільового рівня безпеки SL-3 згідно з ІЕС 62443, пропонується декомпозиція системи на ізольовані зони безпеки, сполучені суворо регламентованими каналами, функціональна схема якої наведена на рис. 1:

- зона А: Містить детектори розсіяного гамма-випромінювання, детектори магнітної сприйнятливості та контролери, що забезпечують ретрансляцію сигналів та взаємодіють з конвеєрними вагами. Це зона найвищої фізичної критичності. Доступ до неї обмежений лише промисловим сегментом мережі, та зовні не доступний.
- зона В: Рівень Java-мікросервісів, розгорнутих у Docker-контейнерах. Тут реалізовано алгоритми взаємодії з віддаленими пристроями, логіку розрахунків вмісту корисного компонента та локальне кешування даних у PostgreSQL. Ця зона виступає «довірем кордоном» (Trust Boundary), де відбувається фільтрація сирих даних.
- зона С (Enterprise Access Zone): Рівень хмарних або центральних серверів підприємства та клієнтських інтерфейсів [11].

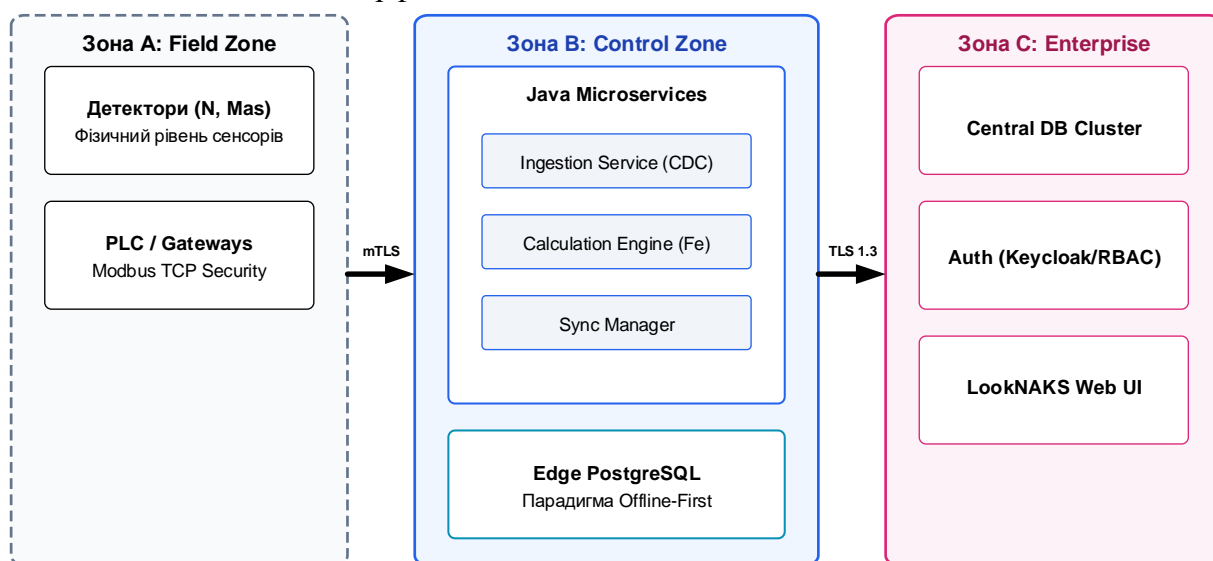


Рисунок 1 - Узагальнена функціональна схема безпечної архітектури

Вибір такої структури дозволяє локалізувати потенційні атаки: компрометація одного мікросервісу в Зоні В не дає прямого доступу до Зони А завдяки використанню Secure Conduits на базі TLS 1.3 [12].

Подальший розвиток запропонованої архітектури передбачає впровадження концепції Zero Trust, відповідно до якої жоден компонент системи не вважається довіреним за замовчуванням, навіть якщо він знаходиться всередині корпоративної мережі. Усі запити між мікросервісами проходять обов'язкову автентифікацію та авторизацію, що реалізується через централізований API Gateway. Такий підхід дозволяє мінімізувати ризики несанкціонованого доступу та забезпечує контроль усіх потоків даних у системі. Взаємодія компонентів базується на використанні протоколів OAuth 2.1 та OpenID Connect, що забезпечують стандартизований механізм управління ідентифікацією користувачів і сервісів [13].

Важливим елементом архітектури є формалізація моделі загроз, яка дозволяє обґрунтувати вибір механізмів захисту. У рамках дослідження виділено основні класи загроз: мережеві атаки (MitM, replay), атаки на рівні прикладного програмного забезпечення, внутрішні загрози та фізичні втручання. Для кожного з них визначено відповідні контрзаходи, що інтегруються безпосередньо у систему. Зокрема, для запобігання replay-атакам використовується комбінація часових міток та одноразових чисел (nonce), що перевіряються на стороні приймача.

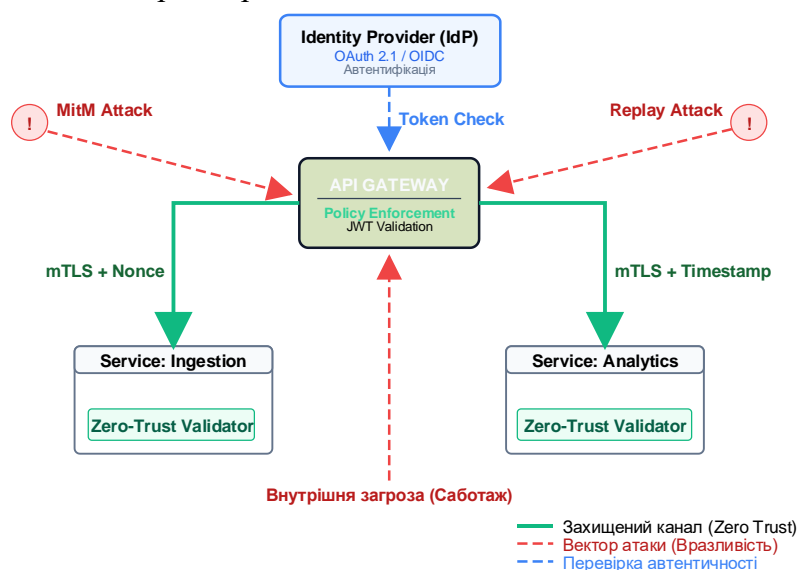


Рисунок 2 – Модель загроз та механізмів захисту

Забезпечення криптографічного захисту даних реалізується на двох рівнях: транспортному та рівні повідомлень. На транспортному рівні використовується протокол TLS 1.3 із взаємною автентифікацією (mTLS), що дозволяє гарантувати конфіденційність та цілісність переданих даних. На рівні повідомлень реалізовано цифровий підпис пакетів, який формується шляхом обчислення хешу (SHA-256) та його підписання за допомогою алгоритму ECDSA. Такий підхід дозволяє забезпечити захист навіть у випадку компрометації каналу зв'язку.

Значна увага приділяється організації обміну даними між компонентами системи. Для цього використовується подієво-орієнтована архітектура (Event-Driven Architecture) з використанням брокера повідомлень. Це дозволяє реалізувати асинхронну взаємодію між сервісами (рис. 3), зменшити залежності між ними та підвищити маштабованість системи.

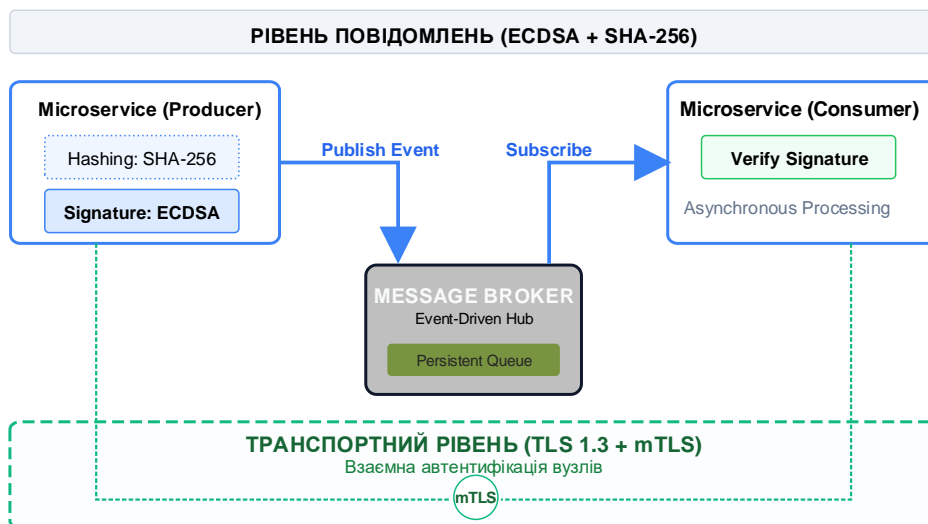


Рисунок 3 – Архітектура обміну даними на основі подій

Одним із ключових аспектів є забезпечення надійності накопичення даних. Для цього запропоновано гібридну модель зберігання, що поєднує локальні бази даних із віддаленими репліками (рис. 4). У кожному вузлі системи функціонує локальна база PostgreSQL, яка працює у режимі offline-first. У разі втрати мережевого з'єднання система продовжує накопичувати дані локально, а після відновлення зв'язку виконується синхронізація.

Механізм синхронізації базується на поєднанні підходів Event Sourcing та Change Data Capture. Усі зміни фіксуються у вигляді подій, що записуються у журнал, після чого передаються до інших вузлів системи у вигляді інкрементальних оновлень.

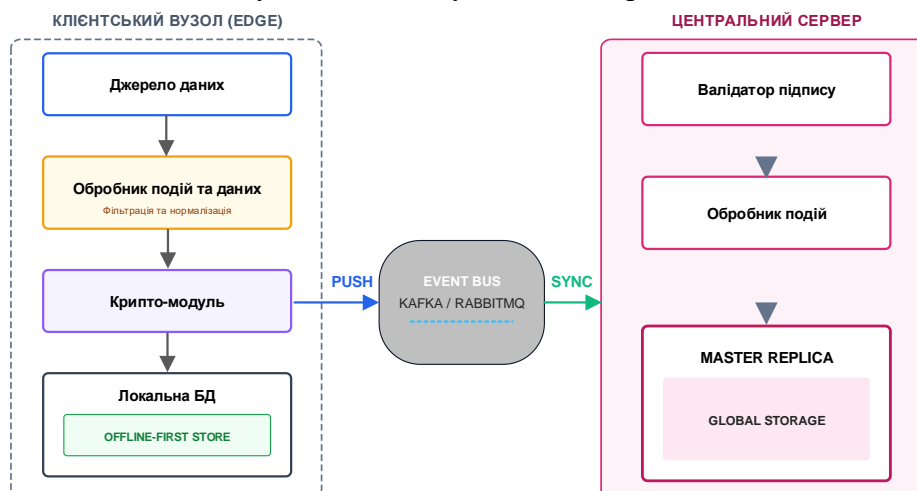


Рисунок 4 – Схема синхронізації даних

Для забезпечення відмовостійкості використовується кластерна архітектура баз даних із підтримкою реплікації та автоматичного перемикання ролей (див. рис. 5). У разі відмови основного вузла одна з реплік автоматично бере на себе його функції, що дозволяє забезпечити безперервність роботи системи.



Рисунок 5 – Архітектура кластеру баз даних

З метою підвищення продуктивності система використовує реактивну модель обробки даних, що базується на неблокуючих потоках. Це дозволяє ефективно обробляти великі обсяги телеметрії у режимі реального часу та забезпечує стабільну роботу навіть при високому навантаженні.

Додатково в архітектуру інтегровано систему централізованого логування та моніторингу, яка дозволяє здійснювати аудит дій користувачів і виявляти потенційні інциденти безпеки. Використання сучасних інструментів аналізу логів забезпечує можливість оперативного реагування на загрози.

Перспективним напрямом розвитку є інтеграція методів машинного навчання для виявлення аномалій у даних. Аналіз потоків телеметрії дозволяє автоматично визначати нетипові значення, що можуть свідчити про несправності обладнання або спроби втручання.

Проведене моделювання показало, що запропонована архітектура забезпечує високу продуктивність та відмовостійкість. Затримка обробки даних не перевищує допустимих значень, а використання реплікації дозволяє уникнути втрати інформації навіть у разі часткових відмов системи.

**Висновки.** Розроблено науково обґрунтовану архітектуру розподіленої системи збору промислових даних, що базується на принципах Security-by-Design і відповідає стандарту IEC 62443 (рівень SL-3). Запропонований підхід усуває критичні недоліки монолітних систем: єдині точки відмови, низьку масштабованість та вразливість каналів зв'язку.

Наукова новизна полягає у формалізації побудови безпечної мікросервісної архітектури, яка поєднує зональну сегментацію, mTLS-автентифікацію, багаторівневе шифрування та гібридне зберігання offline-first. Внеском у розвиток відмовостійких сис-

тем є інтеграція патернів Event Sourcing та Change Data Capture для синхронізації даних у середовищах із нестабільним зв'язком.

Практичне значення результатів підтверджено можливістю модернізації комплексів типу НАКС-ПК. Архітектура гарантує достовірність збору, безпеку передачі та автоматичне відновлення даних. Мікросервісний підхід і контейнеризація забезпечують гнучке масштабування та легку інтеграцію в ІТ-інфраструктуру підприємства.

Рівень безпеки підвищено завдяки концепції Zero Trust, управлінню доступом (RBAC) та системному аудиту, що мінімізує зовнішні та внутрішні загрози. Моделювання підтвердило високу продуктивність системи та стабільність її роботи за умов часткових відмов інфраструктури.

Перспективи досліджень передбачають інтеграцію алгоритмів машинного навчання для предиктивного аналізу якості руди та впровадження edge computing для підвищення автономності системи. Розроблена архітектура відповідає вимогам Industry 4.0 і рекомендована до впровадження на підприємствах гірничо-видобувної галузі.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Оперативний контроль якості руд чорних металів з використанням гамма-випромінювання / А. А. Азарян та ін. // Гірничий вісник. 2022. № 110. С. 13–22. DOI: 10.31721/2306-5435-2022-1-110-13-22.
2. Richards M., Ford N. Fundamentals of Software Architecture: An Engineering Approach. Sebastopol : O'Reilly Media, 2020. 432 p.
3. Microservices: yesterday, today, and tomorrow / N. Dragoni et al. Cham : Springer, 2021. 281 p.
4. Taibi D., Lenarduzzi V., Pahl C. Architectural patterns for microservices: a systematic mapping study. [B. m.] : Springer, 2020. 250 p.
5. Kleppmann M. Designing Data-Intensive Applications: The Big Ideas Behind Reliable, Scalable, and Maintainable Systems. Sebastopol : O'Reilly Media, 2017. 616 p.
6. Kreps J., Narkhede N., Rao J. Kafka: a distributed messaging system for log processing. NetDB, 2011.
7. Carbone P. et al. Apache Kafka: a distributed streaming platform. [B. m.] : [b. n.], 2020.
8. Chen Y., Meng W., Kwok L. F. Industrial IoT security: a survey. [B. m.] : [b. n.], 2022.
9. Zhang Y., Deng R. H. Smart manufacturing security. [B. m.] : Springer, 2021.
10. Industrial communication networks – Network and system security – Part 3-3: System security requirements and security levels : IEC 62443-3-3:2013. Geneva : IEC, 2013.
11. Security for industrial automation and control systems – Part 4-2: Technical security requirements for IACS components : IEC 62443-4-2:2019. Geneva : IEC, 2019.
12. Rescorla E. The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.3 : RFC 8446. 2018. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8446> (дата звернення: 05.04.2026).
13. Hardt D. The OAuth 2.0 Authorization Framework : RFC 6749. 2012. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6749> (дата звернення: 07.04.2026).
14. Grassi P. A. NIST Digital Identity Guidelines : Special Publication 800-63-3. Gaithersburg : NIST, 2020.
15. Humble J., Farley D. Continuous Delivery: Reliable Software Releases through Build, Test, and Deployment Automation. [B. m.] : Addison-Wesley, 2021.

16. SymmetricDS User Guide. 2024. URL: <https://www.symmetricds.org/doc/> (дата звернення: 05.04.2026).

## REFERENCES

1. Azaryan, A.A., Azaryan, V.A., Morkun, V.S., Hrytsenko, A.M., & Trachuk, A.A. (2022). Operatyvnyi kontrol yakosti rud chornykh metaliv z vykorystanniam hamma-vyprominiuvannia [Operational quality control of ferrous metal ores using gamma radiation]. *Hirnychiy Visnyk*, 110, 13–22. <https://doi.org/10.31721/2306-5435-2022-1-110-13-22>
2. Richards, M., & Ford, N. (2020). *Fundamentals of software architecture: An engineering approach*. O'Reilly Media.
3. Dragoni, N., Giallorenzo, S., Lafuente, A. L., Mazzara, M., Montesi, F., Mustafin, R., & Safina, L. (2021). *Microservices: Yesterday, today, and tomorrow*. Springer.
4. Taibi, D., Lenarduzzi, V., & Pahl, C. (2020). *Architectural patterns for microservices*. Springer.
5. Kleppmann, M. (2017). *Designing data-intensive applications: The big ideas behind reliable, scalable, and maintainable systems*. O'Reilly Media.
6. Kreps, J., Narkhede, N., & Rao, J. (2011). *Kafka: A distributed messaging system for log processing*. NetDB.
7. Carbone, P., et al. (2020). *Apache Kafka: A distributed streaming platform*.
8. Chen, Y., Meng, W., & Kwok, L. F. (2022). Industrial IoT security: A survey. *Journal of Cybersecurity and Privacy* (або інше джерело, якщо це стаття).
9. Zhang, Y., & Deng, R. H. (2021). *Smart manufacturing security*. Springer.
10. International Electrotechnical Commission. (2013). *Industrial communication networks – Network and system security – Part 3-3: System security requirements and security levels (IEC 62443-3-3:2013)*.
11. International Electrotechnical Commission. (2019). *Security for industrial automation and control systems – Part 4-2: Technical security requirements for IACS components (IEC 62443-4-2:2019)*.
12. Rescorla, E. (2018). *The Transport Layer Security (TLS) protocol version 1.3 (RFC 8446)*. IETF Datatracker. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc8446>
13. Hardt, D. (2012). *The OAuth 2.0 authorization framework (RFC 6749)*. IETF Datatracker. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc6749>
14. Grassi, P. A. (2020). *NIST digital identity guidelines (Special Publication 800-63-3)*. National Institute of Standards and Technology.
15. Humble, J., & Farley, D. (2021). *Continuous delivery: Reliable software releases through build, test, and deployment automation*. Addison-Wesley.
16. JumpMind. (2024). *SymmetricDS user guide*. <https://www.symmetricds.org/doc/>

Received 17.04.2026.

Accepted 22.04.2026.

Published 30.04.2026

### ***Design of a secure architecture for a distributed industrial data collection and storage system on the java platform***

*Abstract. In the context of industrial digitalization, ensuring the integrity, availability, and security of technological data in the mining industry has become highly relevant. Recent studies indicate that the Security-by-Design concept is a fundamental principle for building*

modern information systems, while microservices and event-driven architectures enhance scalability and flexibility. Particular attention is also paid to Industrial IoT security, IEC 62443 standards, cryptographic protocols such as TLS, and modern authorization mechanisms.

The aim of this study is to design a secure distributed architecture for industrial data collection and storage on the Java platform, ensuring reliable data acquisition, fault-tolerant storage, and controlled access.

The research methodology includes systems analysis, threat modeling, architectural design, and analysis of modern distributed system approaches. A microservices-based architecture is proposed, implementing Security-by-Design principles, zone segmentation in accordance with IEC 62443, and the Zero Trust concept. Secure communication is achieved using TLS 1.3 with mutual authentication (mTLS), while access control is implemented via RBAC. Data exchange is organized using an event-driven architecture. To ensure data reliability, a hybrid storage model (offline-first) with replication and synchronization based on Event Sourcing and Change Data Capture is applied.

The results demonstrate improved fault tolerance, elimination of single points of failure, and continuous system operation under partial failures. The proposed architecture enhances data transmission security, ensures strict access control, and enables comprehensive auditing. The conclusions confirm the effectiveness of the microservices approach and modern security mechanisms for upgrading industrial systems and integrating them into enterprise IT infrastructures in accordance with Industry 4.0 requirements.

Keywords: microservices architecture, Security-by-Design, distributed systems, data protection, fault tolerance, mTLS, RBAC, event-driven architecture, data synchronization.

**Гриценко Андрій Миколайович** – к.т.н., доцент кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8665-853X>

**Азарян Альберт Арамаїсович** – д-р техн. наук, професор, головний науковий співробітник, Криворізький національний університет, Кривий Ріг, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1381-579X>

**Рубан Сергій Анатолійович** – к.т.н., доцент, завідувач кафедри автоматизації, комп'ютерних наук і технологій, Криворізький національний університет, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4495-6667>

**Hrytsenko Andrii** – PhD in Technical Sciences, Associate Professor at the Department of Modeling and Software Engineering, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8665-853X>

**Azaryan Albert** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Kryvyi Rih National University, Kryvyi Rih, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1381-579X>

**Ruban Serhii** - PhD, Docent, Head of the Department of Automation, Computer Sciences and Technologies

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4495-6667>

## МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ СУПУТНИКОВОГО МОНІТОРИНГУ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ У ГІРНИЧОДОБУВНІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

*Анотація.* У статті розглянуто можливості застосування сучасних методів дистанційного зондування Землі для моніторингу гірничодобувних територій та оцінки екологічних ризиків в умовах обмеженого доступу. Особливу увагу приділено комплексному використанню оптичних і радарних супутникових даних та аналізу часових рядів спостережень. На прикладі Щербаківського хвостосховища проаналізовано особливості його структурної організації та виявлено ознаки фільтраційних процесів і можливих витоків на прилеглі території. Показано, що застосування індексу вологості SMI на основі температурних даних Landsat-8 дозволяє ідентифікувати зони підвищеного зволоження. Обґрунтовано, що використання супутникових підходів забезпечує підвищення оперативності та достовірності екологічного моніторингу.

**Ключові слова:** супутниковий моніторинг, дистанційне зондування, хвостосховища, гірничодобувна промисловість, екологічні ризики, індекс SMI, радарні та оптичні дані.

**Вступ.** Україна посідає одне з провідних місць в Європі за мінерально-сировинним потенціалом. На території країни зосереджено понад 20 тисяч родовищ, що охоплюють близько 97 видів мінеральної сировини. У зв'язку з цим гірничодобувна промисловість виступає одним із ключових секторів національної економіки, відіграючи важливу роль у забезпеченні ресурсної незалежності держави. Водночас такий масштаб освоєння надр супроводжується істотним техногенним навантаженням на навколишнє середовище. Інтенсивна експлуатація родовищ призводить до значних змін природних ландшафтів, деградації земельних ресурсів та накопичення значних обсягів відходів гірничого виробництва. У результаті формуються складні техногенні об'єкти, зокрема хвостосховища, відвали та кар'єри, які в багатьох випадках виступають джерелами потенційної екологічної небезпеки, забруднення ґрунтів, поверхневих і підземних вод.

В умовах повномасштабної війни функціонування цієї галузі зазнає суттєвих змін, що супроводжуються зростанням техногенного та екологічного навантаження, а також істотним обмеженням можливостей здійснення належного екологічного контролю на окупованих територіях і в районах активних бойових дій. За оцінками експертів приблизно 30 % підприємств гірничодобувної промисловості знаходяться в окупації або в безпосередній близькості до зони активних бойових дій. Це відчутно обмежує можливості застосування класичних заходів контролю, які базуються на проведенні наземних

обстежень, що в свою чергу ускладнює своєчасне отримання достовірної інформації про стан цих об'єктів. За таких обставин відсутність доступу до територій підприємств фактично унеможливує оперативне реагування на потенційні загрози та підвищує ймовірність розвитку неконтрольованих екологічних процесів. Зазначені явища стали яскравим прикладом низки масштабних екологічних проблем і техногенних ризиків, які за період з 2014 року спостерігаються на тимчасово окупованих територіях Донецької та Луганської областей [1-3].

За таких умов особливої актуальності набуває використання методів дистанційного зондування Землі, які забезпечують можливість отримання об'єктивної та регулярної інформації про стан гірничодобувних територій. Сучасні супутникові системи дозволяють здійснювати моніторинг змін земної поверхні, аналізувати розвиток техногенних процесів і оцінювати екологічні ризики у масштабі як окремих об'єктів, так і регіонів у цілому. Це створює передумови для впровадження автоматизованих підходів до моніторингу гірничодобувної діяльності та підвищення ефективності екологічного контролю в умовах обмеженого доступу до територій

**Постановка проблеми.** Незважаючи на стрімкий розвиток технологій дистанційного зондування Землі, в Україні на сьогодні не сформовано цілісної інтегрованої системи моніторингу гірничодобувної діяльності, яка б передбачала системне використання супутникових даних. Існуючі підходи характеризуються розрізненістю та обмеженою функціональністю, що не дозволяє забезпечити комплексне й оперативне оцінювання стану техногенно трансформованих територій. Проблема посилюється впливом низки чинників, серед яких ключовими є обмежений доступ до частини територій, зокрема в межах зон воєнних дій, недостатній рівень інтеграції різнорідних джерел даних, а також відсутність ефективних автоматизованих інструментів аналізу змін гірничих ландшафтів. За умов необхідності контролю значних площ це суттєво знижує можливості своєчасного виявлення потенційно небезпечних процесів.

Разом із тим традиційні методи моніторингу, що базуються на наземних вимірюваннях, не відповідають сучасним вимогам за показниками оперативності та ресурсоємності [1-3]. Їх обмежена періодичність не дозволяє адекватно фіксувати динаміку змін, що є критично важливим для об'єктів підвищеної екологічної небезпеки, зокрема хвостосховищ. Для таких об'єктів характерний розвиток прихованих процесів, серед яких деформації, порушення стійкості споруд, фільтраційні явища, підтоплення та зміни режимів функціонування.

У зв'язку з цим особливої актуальності набуває впровадження сучасних підходів, що ґрунтуються на використанні супутникових даних і передбачають автоматизований аналіз просторово-часових змін. Це створює передумови для формування систем раннього виявлення небезпечних процесів і забезпечує перехід до більш ефективного та науково обґрунтованого контролю стану гірничодобувних територій.

**Мета і завдання дослідження.** Метою цього дослідження є узагальнення сучасних підходів до використання супутникових методів моніторингу та обґрунтування доцільності їх застосування для контролю стану гірничодобувних територій України. Особливу увагу приділено супутниковому моніторингу Щербаківського хвостосхови-

ща, як ключового об'єкта дослідження з метою оцінки можливостей виявлення основних чинників його техногенного впливу на навколишнє середовище та прогнозування супутніх екологічних ризиків.

**Основна частина.** Сучасний етап розвитку методів дистанційного зондування Землі характеризується розширенням можливостей їх застосування для аналізу техногенно трансформованих територій, зокрема у межах гірничодобувних регіонів. Використання супутникових даних забезпечує систематичне та просторово узгоджене спостереження за територіями з інтенсивним техногенним та екологічним навантаженням, формуючи інформаційну основу для оцінювання змін стану довкілля.

Принципово важливим у цьому контексті є поєднання різних типів супутникових даних. Оптичні знімки (Landsat, Sentinel-2) дозволяють аналізувати структуру земного покриву, стан рослинності та ступінь деградації ґрунтів, тоді як радарні дані Sentinel-1 забезпечують можливість моніторингу незалежно від метеорологічних умов і освітленості. Комплексне використання таких даних створює передумови для безперервного відстеження динаміки техногенних процесів [4].

Ключове значення має аналіз часових рядів супутникових зображень, який дозволяє виявляти розвиток змін, пов'язаних із трансформацією фізичних властивостей поверхні. Зокрема, варіації вологості, порушення ґрунтового покриву та перерозподіл матеріалу відображаються у спектральних і температурних характеристиках, що дає змогу ідентифікувати ділянки потенційного ризику.

Серед об'єктів підвищеної небезпеки особливе місце займають хвостосховища, які є джерелами довготривалого техногенного впливу. Це особливо актуально для уранодобувної промисловості, де у відходах концентруються радіонукліди, важкі метали та токсичні сполуки, здатні до міграції у ґрунтах, підземних і поверхневих водах. У разі порушення цілісності таких об'єктів відбувається поширення забруднюючих речовин на прилеглі території, включаючи сільськогосподарські угіддя, що формує додаткові ризики для екосистем і населення [5-6].

У цьому аспекті показовим є Щербаківське хвостосховище, розташоване на південь від м. Жовті Води. Об'єкт, сформований у природній балці, має складну структуру, що включає стару та нову секції, які відрізняються умовами формування та режимом функціонування. Масштаби даної споруди є значними: вона охоплює площу близько 25 га та містить понад 22 млн м<sup>3</sup> накопичених відходів збагачення уранових руд. Розташування об'єкта лише за 1,5 км від житлової забудови міста зумовлює критичну необхідність постійного моніторингу екологічних загроз. Схематичне розташування об'єкта відносно міста та його фактичний вигляд на мультиспектральному знімку Sentinel-2 за вересень 2025 року представлено на рисунку 1. Червоним маркером позначено центр міста, а контуром окреслено межу зони інтересу (ROI) для подальшого аналізу.



Рисунок 1 - Територіальне розташування секцій Щербаківського хвостосховища:  
а) OSM карта локації з позначенням меж зони інтересу та центру м. Жовті Води;  
б) супутниковий знімок Sentinel-2 від 24 вересня 2025 р.

На основі проведених досліджень встановлено, що для кількісної оцінки фільтраційних процесів та виявлення прихованих зон зволоження найбільш доцільним є використання індексу вологості ґрунту SMI (Soil Moisture Index) [7]. Даний підхід базується на поєднанні температурних характеристик поверхні та вегетаційних показників, що дозволяє нівелювати вплив рослинного покриву при аналізі вологості. У загальному вигляді індекс визначається за формулою:

$$SMI = (LST_{max} - LST) / (LST_{max} - LST_{min}), \quad (1)$$

де  $LST$  — температура земної поверхні, отримана за даними теплових каналів супутника Landsat-8;  $LST_{max}$  та  $LST_{min}$  — граничні значення температури для сухих і зволжених умов відповідно.

Фізичний зміст індексу полягає у відображенні відносного рівня вологості поверхні: зниження температури, як правило, відповідає підвищеній вологості внаслідок інтенсивного випаровування. Таким чином, аномально високі значення SMI, зафіксовані в межах Щербаківського хвостосховища або на прилеглих територіях, безпосередньо свідчать про наявність зон інфільтрації або витоків техногенних вод. Дослідження базувалося на аналізі часових рядів оптичних даних Landsat-8 за період 2013–2020 рр., що дозволило дистанційно оцінити динаміку обох секцій хвостосховища, ідентифікувати критичні зони та проаналізувати стабільність складованих матеріалів (рисунок 2).

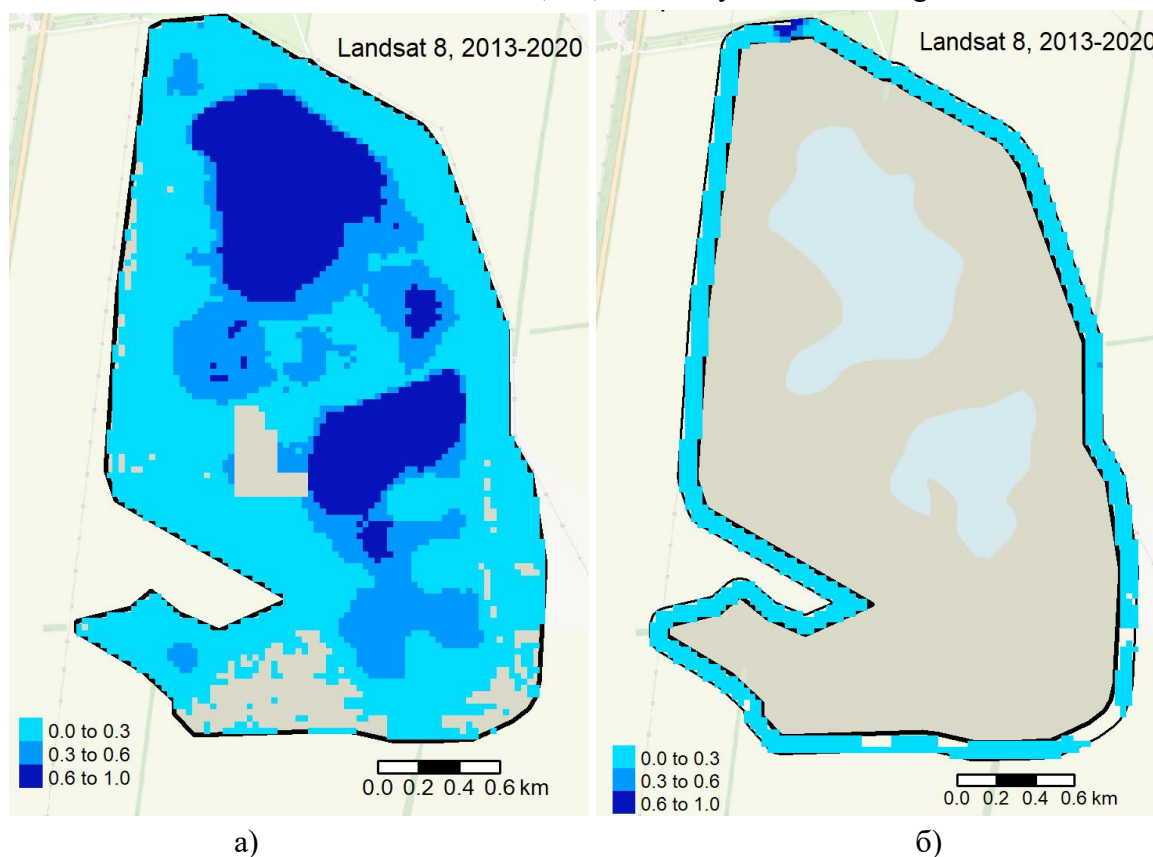


Рисунок 2 -Просторово-часова динаміка стану Щербаківського хвостосховища за даними Landsat 8 (2013-2020 рр.): а) результати аналізу динаміки індексу вологості ґрунту (SMI), що демонструють зони підвищеної вологості всередині хвостосховища; б) результати аналізу динаміки індексу вологості ґрунту (SMI), що демонструють зони підвищеної вологості в межах бортів хвостосховища

Обробка даних дозволяє зафіксувати локальні аномалії SMI за межами огорожувальних споруд, що свідчить про наявність фільтраційних витоків. Виявлені зони підвищеного зволоження просторово корелюють із напрямками міграції техногенних вод у бік сільськогосподарських територій. Оскільки рідка фаза відходів містить розчинені токсичні компоненти, їх неконтрольована міграція створює загрозу накопичення небезпечних речовин у рослинності та їх подальшого включення у трофічні ланцюги. Отже, використання температурних даних у поєднанні з аналізом часових рядів дозволяє не лише фіксувати положення аномалій, а й оцінювати їх динаміку. Це є принципово важливим для прогнозування екологічних наслідків та планування заходів з мінімізації техногенного впливу на навколишнє середовище.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження підтверджено, що сучасні методи дистанційного зондування Землі є ефективним інструментом моніторингу гірничодобувних територій та оцінювання стану об'єктів техногенного походження в умовах обмеженого наземного доступу. Встановлено, що використання мультиспектральних супутникових даних забезпечує можливість систематичного відстеження змін та своєчасного виявлення небезпечних процесів, зокрема тих, що мають прихований ха-

рактер розвитку. Доведено доцільність поєднання оптичних знімків Sentinel-2 та теплових каналів Landsat-8, що дозволяє одночасно аналізувати структуру земного покриву, динаміку рослинності та просторовий розподіл вологості [9-11]. Застосування аналізу часових рядів супутникових спостережень суттєво підвищує достовірність оцінювання, забезпечуючи виявлення техногенних трансформацій із вираженою просторово-часовою динамікою.

На прикладі Щербаківського хвостосховища встановлено, що його структурна неоднорідність зумовлює диференційований характер екологічного впливу окремих секцій. Зокрема, для старої секції більш характерними є процеси дефляції та вторинного пилового забруднення, тоді як у межах нової секції домінують фільтраційні явища та формування зон наднормативного зволоження. Виявлено, що використання супутникових індикаторів, зокрема температурних характеристик на основі розрахунку індексу вологості ґрунту (SMI), дозволяє чітко ідентифікувати зазначені процеси та локалізувати витoki техногенних вод за межі огорожувальних споруд у бік сільськогосподарських угідь.

Узагальнюючи отримані результати, можна стверджувати, що впровадження супутникового моніторингу формує науково-методичне підґрунтя для переходу до системного контролю стану гірничодобувних регіонів України. Це особливо актуально в умовах воєнного стану та обмеженого доступу до об'єктів підвищеної небезпеки, де традиційні методи спостережень є малоефективними. Застосування запропонованих підходів сприяє підвищенню оперативності виявлення екологічних ризиків, забезпечує обґрунтовану підтримку прийняття управлінських рішень та загалом підвищує рівень екологічної безпеки у промислово навантажених регіонах.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. UNEP. *Environmental Impact of the Conflict in Ukraine: A Preliminary Review and Updates for 2025–2026*; United Nations Environment Programme: Nairobi, Kenya, 2026. Available online: <https://www.unep.org/resources/report/environmental-impact-conflict-ukraine> (accessed on 7 April 2026).
2. OSCE. *Environmental Risks of the War in Ukraine: Monitoring and Assessment of Industrial Facilities on the Occupied Territories*; Organization for Security and Co-operation in Europe: Vienna, Austria, 2025. Available online: <https://www.osce.org/project-coordinator-in-ukraine/environmental-risks> (accessed on 7 April 2026).
3. Zoï Environment Network. *Environmental Risks in the Conflict Zone of Eastern Ukraine (Updated Analysis)*; Prepared for OSCE and UNEP: Geneva, Switzerland, 2025. Available online: <https://zoinet.org> (accessed on 7 April 2026).
4. Clerici, N.; Valbuena Calderón, C.A.; Posada-Posada, J.M. Fusion of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for land cover mapping in a complex heterogeneous landscape. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 2017, 58, 204–215. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2017.02.007>.
5. Petropoulos, G.P.; Partiman, K.P.; Srivastava, P.K. Bridging the gap between land surface temperature and soil moisture retrieving: A review. *Theor. Appl. Climatol.* 2018, 133, 1121–1142. <https://doi.org/10.1007/s00704-017-2233-2>.

6. Schmidt, P.; Lauenstein, G. Monitoring of Uranium Tailings: Environmental Risks and Remote Sensing Applications. *J. Environ. Radioact.* 2021, 231, 106565. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2021.106565>.
7. Sandholt, I.; Rasmussen, K.; Andersen, J. A simple interpretation of the surface temperature/vegetation index space for assessment of surface moisture status. *Remote Sens. Environ.* 2002, 79, 213–224. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00274-7](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00274-7).
8. Zhu, Z. Change detection using Landsat time series: A review of frequencies, preprocessing, algorithms, and applications. *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 2017, 130, 370–384. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.06.013>.
9. Kavats, O.; Khramov, D.; Sergieieva, K. Open Pit Mining Activity and Stability Area Mapping in the Pyhäsalmi Mine using a Time Series of Sentinel–1 Images. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 2026, 559(1). <https://doi.org/10.1144/gslspecpub2023-216>.
10. Kavats, O.; Khramov, D.; Sergieieva, K.; Puputti, J.; Joutsenvaara, J.; Kotavaara, O. Optimal threshold selection for water bodies mapping from Sentinel-1 images based on Sentinel-2 water masks. In *Proceedings of the IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, Kuala Lumpur, Malaysia, 17–22 July 2022; pp. 5551–5554. <https://doi.org/10.1109/IGARSS46834.2022.9883600>.
11. Kavats, O.; Khramov, D.; Sergieieva, K.; Vasyliiev, V. Algorithm for statistical downscaling of land surface temperature using ElasticNet. *Rev. Bulg. Geol. Soc.* 2020, 81(3), 195–197.

Received 20.04.2026.

Accepted 24.04.2026.

Published 30.04.2026

### ***Methodological approaches and information technologies for satellite monitoring of environmental risks in the mining industry***

*This article examines modern remote sensing technologies and their role in ensuring the environmental safety of mining regions in Ukraine. The mining industry is regarded as a strategic sector which, at the same time, places a significant anthropogenic burden on the environment due to the accumulation of waste in tailings ponds. The challenges of monitoring these sites have become significantly more acute as a result of military operations and restricted access to industrial sites, which makes traditional ground-based surveys impossible. The use of satellite platforms is a key tool for obtaining objective information on the state of the environment in hard-to-reach areas.*

*The aim of this study is to justify methodological approaches to the use of satellite data for the operational monitoring of mining areas and to develop a risk assessment technique based on spectral-temperature indices. The Shcherbakivske tailings pond, which contains radionuclides and toxic compounds of uranium ores, was selected as the object of study. The effectiveness of integrating satellite data for analysing the dynamics of man-made landscapes was analysed. A methodology was developed for using the Soil Moisture Index (SMI), based on a combination of thermal bands and vegetation indices. This approach allows the influence of vegetation to be mitigated and hidden zones of anthropogenic water infiltration to be identified. Based on the analysis of time series, SMI anomalies were recorded beyond the tail-*

*ings dam, indicating filtration leaks towards agricultural land and risks of contamination of food chains.*

*The introduction of satellite monitoring is essential for overcoming the fragmentation of environmental monitoring systems in Ukraine. The use of temperature data, combined with automated data processing, facilitates the transition to systematic early detection of hazardous processes.*

*Keywords: satellite monitoring, remote sensing, tailings ponds, mining industry, environmental risks, SMI index, radar and optical data.*

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

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0172-7856>

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

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-0172-7856>

С.Д. Лучик, І.В. Мудрицький, О.О. Мойко, Р.М. Стецик

## КІБЕРГІГІЕНА МОЛОДИ У СОЦІАЛЬНИХ ПЛАТФОРМАХ: ВІД АНАЛІЗУ АІТМ-АТАК ДО МОДЕЛЕЙ БЕЗПЕЧНОЇ ПОВЕДІНКИ

*Анотація. В статті проведено комплексне дослідження ризиків, з якими стикається молодіжна аудиторія у сучасних соціальних медіапросторах. Актуальність дослідження зумовлена стрімким розвитком методів соціальної інженерії, що переважно базуються на психологічних маніпуляціях. Представлено класифікацію соціальних мереж за віковими групами користувачів, що дозволило ідентифікувати пріоритетні вектори атак для кожної платформи. На основі емпіричного опитування виявлено критичні прогалини в цифровій обізнаності молоді: встановлено, що значна частина респондентів є вразливими до атак типу Adversary-in-the-Middle (AiTM) через нездатність розпізнати підроблені домени, а також ігнорують відсутність протоколів шифрування даних. Детально проаналізовано механіку перехоплення сесійних токенів та подальшого захоплення облікових записів (Account Takeover).*

*Практичне значення дослідження полягає у розробці трійрусної моделі захисту, що включає загальносистемні, платформно-орієнтовані (Telegram, Instagram, TikTok) та мережеві (Wi-Fi безпека) рекомендації. Запропонований освітньо-поведінковий підхід зміщує акцент із суто технічних засобів захисту на формування активної цифрової стійкості користувача.*

*Ключові слова: соціальна інженерія, соціальні мережі, кібергігієна, атака AiTM (Adversary-in-the-Middle), захоплення акаунту (Account Takeover), фішинг, вразливість користувачів, цифрова стійкість.*

**Вступ.** Соціальні мережі глибоко інтегрувались в сучасне життя українців. Вони створюють спільний цифровий простір для різних поколінь людей. За даними ресурсу «Громадський простір», станом на жовтень 2025 року в Україні соціальними мережами охоплено 58,5% населення. Порівняно з минулим роком кількість користувачів соціальних мереж зросла на 6,5% або на 1,4 млн осіб. На кінець 2025 року соцмережами користувалися 20,8 млн людей віком 18+ [1].

Сьогодні соціальні мережі - це не лише цифровий простір для фото, постів і реакцій користувачів. Аудиторія активно мігрує між платформами і шукає нові формати контенту. Соціальні платформи є лідерами серед джерел отримання новин. Серед них Telegram-канали, Facebook, Viber та інші. YouTube став для користувачів новим телебаченням, а TikTok — пошуковою системою. Відзнакою сучасних соціальних платформ є робота у режимі постійної взаємодії з користувачем, де різний контент ство-

рюється і поширюється надто швидко. Так швидко, що на нього можуть не встигнути відреагувати модератори мереж або правоохоронні органи. Проте, встигають злочинці. Усі публічні пости, які користувач створює або/і поширює, дають зловмиснику можливість здійснити психологічну оцінку вибраної жертви, і надалі маніпулювати цими даними для здійснення злочину або кіберзлочину. Зловмисники «атакують» не лише пересічних громадян, а й військовослужбовців, журналістів, волонтерів, державних службовців з метою отримання інформації, яка може виявитися корисною, або ж задля поширення фейкової інформації, під чужим іменем, що, зазвичай, спричинює значний інформаційний вплив на свідомість громадян, особливо молодих людей.

**Постановка проблеми.** Фахівці відмічають, що 98% кібератак здійснюються за допомогою саме методів психологічного маніпулювання людьми, або методів соціальної інженерії, щоб отримати конфіденційні дані чи увійти в систему з обмеженим доступом. При цьому злочинці використовують такі емоційні складники, як страх, соціальні та родинні зв'язки, невпевненість і неухважність. Велика кількість людей хоча б раз стикалася з підробними фішинговими листами від так званих колег, телефонними дзвінками від «представників банку» і «родичів, які опинилися в біді» тощо. Через простий аналіз профілю обраної жертви зловмисник може визначити вразливі тематики користувача і використати їх для подальшої атаки за допомогою соціальної інженерії.

Молодь є найактивнішою та найбільш представленою категорією користувачів у соціальних медіа, де їхня висока цифрова грамотність часто супроводжується психологічною вразливістю та браком життєвого досвіду в розпізнаванні маніпуляцій. Схильність до самовираження та надмірного поширення особистої інформації створює ідеальний «цифровий портрет» для зловмисників, дозволяючи їм застосовувати високоточні методи соціальної інженерії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблематика кібератак, що здійснюється за допомогою соціальної інженерії, залишається об'єктом досліджень як українських, так і міжнародних досліджень. Досліджуючи праці зарубіжних авторів, соціальна інженерія визначається насамперед як метод психологічного впливу на людину.

Згідно з визначенням NIST, соціальна інженерія - це психологічна маніпуляція, спрямована на людську схильність до помилок, а не на вразливі програмного забезпечення. Зловмисники знають, що часто легше обдурити людину, ніж пробити брандмауер [2]. Jan-Willem H. Bulee та інші підкреслюють, що ефективність соціальної інженерії спрямована не на технічні, а на когнітивні чинники, а найбільш дієвим способом протидії соціальної інженерії є формування навичок кібергігієни шляхом навчання цифрової обізнаності користувачів [3].

Дослідник М. Халіл також акцентує увагу на передбачуваних когнітивних упередженнях, що застосовують злочинці. І визначає ключові тригери, на які вони покладаються при використанні методів соціальної інженерії. Це:

- страх і терміновість- найпоширеніший та найефективніший тригер, оскільки він змушує викликати негайну емоційну реакцію;
- авторитет і довіра - люди звикли підкорятися авторитетним особам;

- цікавість і жадібність - бажання отримати винагороду, приз - спонука людей натискати на шкідливі посилання або відкривати заражені вкладення [2].

Отже, соціальна інженерія надзвичайно небезпечна. Використовуючи людські слабкості та вразливості, вона легко вписується в повсякденну ділову діяльність людей, змушує кожного повірити у щось нереальне, неправдиве, щоб змусити їх надати особисту інформацію, яка надалі може бути використана для їхнього обману. S. Groř визначає соціальну інженерію як один з видів ведення інформаційної війни [4].

Небезпечність соціальної інженерії значно посилив штучний інтелект, який допомагає злочинцям імітувати голоси, створювати реалістичні електронні листи та навіть здійснювати фальшиві відеодзвінки. Багато з цих прийомів взагалі не залишають слідів шкідливого програмного забезпечення, вони досягають результату, тому що люди приймають їх за справжні.

В останні роки набув поширення термін «соціальний інжиніринг», який використовується у сфері захисту комп'ютерних мереж, програм і баз даних. Він позначає низку кіберзлочинів – шахрайських схем несанкціонованого доступу до конфіденційної інформації, поширення дезінформації та ведення ПСО (інформаційно-психологічна операція) [6]. Основна мета соціальних інженерів – це отримання доступу до захищених систем з метою крадіжки інформації, паролів, даних, тощо.

Звичайно, що роботодавці інвестують кошти в навчання персоналу з питань безпеки, проте порушення продовжуються. Це вказує на глибокий «прогалину в діях щодо обізнаності». Багато співробітників знають, що дія є ризикованою, але все одно роблять її для зручності або економії часу. Це переосмислює проблему «людського фактора». Це не завжди помилка користувача; часто це помилка в проекті безпеки. Л. Половенко та С. Мерінова наголошують, що основною передумовою соціальної інженерії є низький рівень обізнаності працівників щодо соціотехнічних атак та безпека інформаційної системи залежить від вивчення працівниками основ соціального інжинірингу та неухильного дотримання вимог політики безпеки, дотримання правил «цифрової гігієни» [7].

Законодавство України про кібербезпеку встановлює ефективні механізми реагування на кіберзагрози та кіберінциденти. Так, Закон України «Про основні засади забезпечення кібербезпеки України» (2017 р.) визначає правові та організаційні основи забезпечення захисту життєво важливих інтересів людини і громадянина, суспільства та держави, національних інтересів України у кіберпросторі, основні цілі, напрями та принципи державної політики у сфері кібербезпеки, повноваження державних органів, підприємств, установ, організацій, осіб та громадян у цій сфері, основні засади координації їхньої діяльності із забезпечення кібербезпеки. Проте, принципи застосування Закону не поширюються на соціальні мережі [8].

В Стратегії кібербезпеки України «Безпечний кіберпростір - запорука успішного розвитку країни» (2021 р.) вказується на стрімке поширення кіберзагроз на усі сфери життєдіяльності та необхідність постійного вдосконалення інструментарію їх реалізації. Підкреслюється невідповідність сучасним вимогам рівня підготовки та підвищення кваліфікації фахівців з питань кібербезпеки та кіберзахисту [9]. Однак, як і в по-

передньому документі, не виділяються окремо завдання боротьби з соціальною інженерією.

Отже, в сучасних умовах, умовах війни в Україні, коли соціальні платформи є основним інструментом комунікацій, а соціальна інженерія залишається причиною номер один порушень інформаційної та кібернетичної безпеки в державі, дослідження цих проблем слід продовжувати.

**Мета статті.** Метою статті є розробка комплексної моделі освітньо-поведінкового захисту молоді від методів соціальної інженерії в соціальних мережах на основі аналізу специфічних вразливостей (зокрема AiTM-атак та АТО), виявлених під час емпіричного дослідження рівня кібергігієни студентів та курсантів.

Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання:

- проаналізувати теоретичні аспекти класифікації сучасних соціальних мереж за віковими групами користувачів та ідентифікувати специфічні загрози, характерні для кожної платформи;
- дослідити емпіричним шляхом рівень обізнаності молодіжної аудиторії з правилами кібергігієни та виявити пріоритетні медіапростори, що мають найбільшу концентрацію ризиків соціальної інженерії;
- здійснити кількісну та якісну оцінку вразливостей респондентів до змодельованих кібератак;
- сформулювати рекомендації (загальносистемні, платформно-орієнтовані та мережеві), спрямовані на формування стійких навичок цифрової безпеки та превентивну протидію соціальній інженерії.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Соціальна мережа, як цифрова екосистема, являє собою комплексну онлайн-платформу, що об'єднує користувачів, контент, бізнес та сервіси в єдине середовище взаємодії. Вона функціонує як саморегульована система (як біологічна), де взаємозалежні елементи: профілі, контент, алгоритми тучного інтелекту, фінансові інструменти, впливають на поведінку людей.

Сучасний ландшафт соціальних мереж характеризується високою концентрацією користувачів на кількох платформах, що полегшує роботу соціальним інженерам через масштабність охоплення. У 2026 році світові тренди змістилися від простого споживання контенту до глибокої інтеграції зі штучним інтелектом та пошуковими алгоритмами. Така інтеграція супроводжується концентрацією даних, автоматизацією прийняття рішень та появою нових типів атак на AI-системи, що обумовлює необхідність підвищення рівня кібербезпеки, захисту даних, алгоритмів та інформаційних систем від нових кіберзагроз.

Визначимо основні тренди використання соціальних мереж користувачами різного віку та зв'язок їх з безпекою, тобто віково-орієнтовані соціальні мережі з платформною довірою. Користувачі різного віку схильні довіряти різним платформам, і саме ці платформи стають для них основним джерелом інформації, комунікації та формування думки. Таким чином, різні покоління остаточно закріпилися на "своїх" майданчиках (табл. 1):

Віково-орієнтовані соціальні мережі з платформною довірою

Клас соціальних мереж, вік	Платформа довіри	Тип довіри	Особливості
Дитячі та підліткові (0-12), включає вікові підгрупи:			
0-5	YouTube, YouTube Kids, TikTok (через батьків), Instagram (перегляд фото/відео)	Абсолютна візуально-емоційна довіра	Не є самостійними користувачами соціальних мереж, однак фактично активно присутні у цифровому середовищі через батьків або дитячі платформи.
6-9	YouTube, TikTok, Roblox, Minecraft, Месенджери (через батьків)	Авторитетно-рольова довіра	Цікавить ігровий, пригодницький та блогерський контент
10-12	TikTok, Instagram, Telegram, Viber, Discord	Соціально-мережева довіра	Соціальний контент, самопрезентація, спілкування, тренди.
Молодіжні, 12–25	TikTok, Instagram, Snapchat, YouTube, Telegram, Discord, Twitch	Емоційна	Короткий відеоконтент; емоційна подача інформації; довіра до особистого досвіду блогерів; висока швидкість поширення інформації; високі ризики дезінформації
Соціально-інформаційні, 25-45	Facebook, X, LinkedIn, WhatsApp	Соціальна	Новини; професійні контакти; аналітика; обговорення подій; формування суспільної думки
Старша аудиторія, 45+	Facebook, YouTube, форуми, локальні групи	Традиційна	Корисна інформація та експертні поради; соціально-політична аналітика та новини; освітній контент з цифрової грамотності; сімейно-орієнтований контент

Діти вікової групи 0-12 років переважно не є самостійними користувачами соціальних мереж. Однак, фактично активно присутні у цифровому середовищі через батьків або дитячі платформи. Їх використання соціальних мереж має опосередкований або розважально-освітній характер. У цій віковій групі важливо розрізняти не лише спосіб використання соціальних мереж, а й тип контенту, який вони споживають, оскільки саме контент формує поведінку, мислення та цифрові ризики.

Для вікової групи 0–12 років доцільно говорити про тип довіри до інформації та джерел у соціальних мережах, оскільки діти по-різному сприймають контент, блогерів, рекламу та онлайн-знайомства. Дуже важлива закономірність: Емоції → Авторитет → Соціальна група → Власна думка (після 13–14 років). Тобто:

- маленькі діти довіряють тому, що красиве;
- молодші школярі — тому, хто популярний;
- передпідлітки — тому, що кажуть друзі;
- підлітки — тому, що відповідає їх поглядам.

Це дуже важливо для розуміння тих ризиків і небезпек, які несуть соціальні мережі користувачам цієї вікової групи. Це інформаційні ризики (фейки, реклама, шкідливий контент), соціальні ризики (шахрайство, кібербулінг, грумінг, соціальна інженерія), психологічні ризики (тривожність, порушення сну, агресія, зниження самооцінки, ізоляція), технічні ризики (віруси, фішинг, злом акаунтів, витік даних, платні підписки, донати).

Вікова група 12–25 років є найактивнішою категорією користувачів соціальних мереж. Це вже не просто споживачі контенту, а повноцінні учасники цифрового середовища, які формують інформаційний простір, тренди, онлайн-спільноти та цифрову економіку. Так, соцмережі стають середовищем спілкування та самоствердження для підлітків віком 12-15 років, інструментом формування особистості та соціального статусу для молодих людей віком 16-18 років, інструментом навчання, роботи та соціальних зв'язків для молоді віком 19-21 років, інструментом кар'єри, бізнесу та нетворкінгу для більш старшої групи осіб віком 22-25 років.

До основних ризиків для користувачів соцмереж віком 12–25 років слід віднести: онлайн-шахрайство, фішинг, залежність від соцмереж, нелегальний контент, вербування через соцмережі тощо. Найбільш небезпечне середовище для молоді створюють такі мережі як TikTok, Telegram, Discord.

Для вікової групи користувачів соцмереж віком 25-45 років характерний високий рівень прагматизму у використанні соціальних мереж. Їх професійна діяльність і приватне життя нерозривно пов'язані з використанням соціальних медіаплатформ.

Ризики для користувачів соцмереж даної вікової групи обумовлені їхньою високою цифровою активністю та інтеграцією соціальних мереж у професійну діяльність, що робить їх пріоритетними цілями для складних атак із застосуванням соціальної інженерії, таргетованого фішингу та дезінформаційних кампаній. Основними загрозами є компрометація персональних і корпоративних даних через надмірне поширення інформації, фінансові втрати внаслідок вразливості до маніпулятивних технік, а також психологічне виснаження, спричинене синдромом FOMO та алгоритмічною поляризацією

контенту. Крім того, формування стійкого цифрового сліду створює довгострокові репутаційні ризики та можливості для несанкціонованого збору даних методами OSINT, що в умовах низької інформаційної гігієни може призвести до деструктивного впливу на професійний статус та особисту безпеку користувача.

Старша вікова категорія (45+ років) користувачів соціальних мереж демонструє консервативний підхід до вибору платформ (переважно Facebook, YouTube, месенджери типу Viber/WhatsApp) та має високий рівень цифрової довіри. Досить часто використання соцмереж спрямовується на підтримку родинних і дружніх зв'язків, а також на пошук тематичних спільнот за інтересами (садівництво, здоров'я, побут тощо).

Основними загрозами для цієї вікової групи є фінансові втрати через соціальну інженерію (зокрема схеми «допомоги близьким» або псевдомедичні послуги), викрадення особистих даних внаслідок нехтування базовими правилами кібергігієни (відсутність складної автентифікації, перехід за фішинговими посиланнями), а також висока ймовірність стати інструментом для масового поширення фейків. На відміну від молодших груп, загрози для даної категорії часто мають більш виражений психоемоційний характер, що призводить до глибокої соціальної дезорієнтації та значних матеріальних збитків.

Отже, проведені класифікація соціальних мереж і аналіз ризиків та небезпек для користувачів для кожної групи мереж виявив наступне. У різних соціальних мережах домінують різні методи соціальної інженерії, що зумовлено віковою аудиторією платформи, функціональними можливостями та рівнем довіри між користувачами. Так, Facebook та Instagram переважно використовуються для емоційно-маніпулятивних шахрайських схем, Telegram — для поширення фішингу та шкідливого програмного забезпечення, TikTok — для масових шахрайських кампаній, а LinkedIn — для таргетованих атак соціальної інженерії на організації та співробітників.

При розробці ефективних методів захисту від кіберзлочинців в соціальних мережах необхідно враховувати специфіку вразливостей різних вікових груп користувачів. Нами було проведено спеціалізоване соціальне опитування серед молодих людей: студентів, курсантів закладів вищої освіти для визначення вразливостей. У соціальному опитуванні взяли участь понад 500 респондентів, вікова група яких 14-24 роки. Частина вибірки (понад 80%) склали особи віком від 18 до 24 років та 15% віком 14-17 років. Соціальне опитування проводилося за допомогою платформи Google Forms у формі онлайн-анкетування.

Результати практичного дослідження демонструють, що значна частина користувачів все ж таки залишається вразливою до соціально-інженерних атак (табл. 2).

Реакція респондентів на змодельовані сценарії атак

Сценарій атаки	Схильність до ризику (%)	Кількість осіб
Перехід за посиланням «Ваш акаунт буде заблоковано!»	7.2%	37
Введення даних на <a href="https://instagram.com.ua">https://instagram.com.ua</a>	24.5%	125
Перехід з проханням підписати петицію за посиланням “ <a href="https://bit.ly/petitsia">https://bit.ly/petitsia</a> ”	12.9%	66
Участь у підозрілих конкурсах у соціальних мережах	7.8%	40
Пропозиція покупки товару на дуже вигідною ціною	6.1%	31
Довіра до сайтів із протоколом http	21.1%	108

Детальний аналіз статистичних даних, отриманих у результаті проведення онлайн опитування, дозволяє зробити висновки:

- критична вразливість — підроблені домени (24.5%): Майже кожен четвертий респондент (125 осіб) готовий ввести дані на фейковому ресурсі [instagram.com.ua](https://instagram.com.ua). Це свідчить про низьку увагу до адресного рядка (URL), що є ідеальним підґрунтям для фішингу;
- технічна довірливість (21.1%): високий рівень довіри до незахищеного протоколу http (108 осіб) демонструє прогалину в базових знаннях про шифрування даних;
- соціально-цивільна маніпуляція (12.9%): використання скорочених посилань (наприклад, [bit.ly](https://bit.ly/petitsia)) під виглядом петицій є ефективним гачком, оскільки молодь має активну громадянську позицію.

Отже, аналіз реакції респондентів на змодельовані атаки (табл. 3) виявив парадокс: молодь демонструє високу стійкість до прямих загроз блокування (лише 7.2% ризику), проте виявляється критично вразливою до інструментів візуальної імітації довірених ресурсів. Показник у 24.5% успішних атак через підміну домену [instagram.com.ua](https://instagram.com.ua) свідчить про те, що архітектура загроз у молодіжному середовищі змістилася від "залякування" до "мімікрії" під звичні цифрові сервіси.

Результати опитування підтверджують, що значна частина осіб віком від 14 до 24 років готові ввести свої дані на підробленому домені <https://instagram.com.ua>. Це створює ідеальні умови для використання сучасних методів перехоплення доступу. Зокрема, слід виділити архітектуру AiTM (Adversary-in-the-Middle) та подальшого АТО (Account Takeover).

Згідно матриці MITRE ATT&CK, T1557 Adversary-in-the-Middle (AiTM) описує тип атаки, при якій зловмисник створює проксі-сервер між користувачем та сервісом. У контексті нашого соціального опитування було виявлено, що 24.5% респондентів пе-

рейшли б за посиланням [instagram.com.ua](https://instagram.com.ua), внаслідок чого не розпізнали підроблений домен та стали потерпілими внаслідок атаки AiTM.

На відміну від фішингових посилань, атака типу AiTM не потребує копії сайту, оскільки зловмисник розгортає сервер-посередник, який у реальному часі транслює запити до справжнього сайту чи сервісу. Серед головних переваг атаки такого типу слід виділити:

- обхід Multi-Factor Authentication: коли користувач вводить свої кредити для входу та здійснює етап мультифакторної автентифікації на підробленому домені, зловмисник отримує усі дані та транслює їх до легітимного сервісу чи сайту;

- викрадення токена: після успішного входу легітимний сервіс/сайт видає сесійний cookie, який підтверджує, що користувач пройшов перевірку. Зловмисник отримує його та потім транслює до користувача;

- авторизований доступ: внаслідок отримання сесійного cookie, зловмисник імпортує його у власний браузер. Це надає зловмиснику повний доступ до облікового запису та не потребує паролю MFA. Успішна реалізація цього етапу є лише проміжним етапом, що веде на Account Takeover (ATO). Отримавши доступ до акаунту соціальної мережі внаслідок здійснення атаки AiTM, зловмисник прагне отримати повний контроль над обліковим акаунтом, щоб користувач не зміг повернути контроль;

- зміна даних: в першу чергу зловмисник змінює електронну пошту та номер телефону;

- скидання паролів: після успішної зміни електронної адреси та номеру телефону зловмисник реалізує скидання паролю. Оскільки зловмисник вже змінив пошту, справжній власник не має доступу до його зміни.

Отримані результати емпіричного дослідження дозволяють констатувати критичний розрив між високою інтенсивністю використання соціальних мереж молоддю та реальним рівнем їхньої цифрової стійкості. Схильність 24.5% респондентів до взаємодії з підробленими доменами (на прикладі [instagram.com.ua](https://instagram.com.ua)) свідчить про те, що сучасна архітектура атак типу Adversary-in-the-Middle (AiTM) ефективно експлуатує візуальну довіру користувача, повністю нівелюючи традиційні технічні бар'єри безпеки.

Комплексний аналіз механіки Account Takeover (ATO) у поєднанні з даними опитування підтверджує наступні деструктивні тенденції:

- нівелювання багатфакторної автентифікації (MFA): Високий відсоток успішних переходів за фішинговими посиланнями доводить, що для підготовленого зловмисника MFA більше не є панацеєю, оскільки техніка AiTM дозволяє перехоплювати сесійні токени в реальному часі;

- психологічна невідповідність: Найнижчий рівень ризику (7.2%) при сценарії "блокування акаунту" вказує на те, що молодь навчилася розпізнавати прямий агресивний тиск, проте виявляється безпорадною перед методами "м'якої мімікрії" під легітимні сервіси;

- технологічна інерційність: Довіра 21.1% опитаних до незахищеного протоколу http свідчить про ігнорування базових індикаторів безпеки браузера, що робить автоматизований збір даних максимально ефективним;

- експлуатація ідентичних облікових даних: оскільки користувачі часто використовують однакові кредити для входу (логін, пароль) для різних сервісів, успішне захоплення одного акаунту може призвести до перебору акаунтів інших сервісів/соціальних мереж;

- використання фактора довіри: зламаний акаунт стає джерелом розповсюдження нових атак, оскільки зловмисник може розсилати надалі фішингові посилання друзям з метою отримання несанкціонованого доступу до акаунтів соціальних мереж інших осіб чи з метою отримання фінансової вигоди, нанесення удару по репутації/довірі тощо.

Таким чином, успішна реалізація етапу АТО є закономірним результатом низької уваги молоді до деталей цифрового середовища та відсутності навички динамічної верифікації джерела інформації. Це обґрунтовує необхідність радикального перегляду стратегій захисту: перехід від статичних інструкцій до формування адаптивної моделі кібергігієни, що базується на критичному аналізі інтерфейсів та впровадженні поведінкових алгоритмів "нульової довіри" (Zero Trust) у повсякденну комунікацію.

Сформулюємо рекомендації, спрямовані на формування у молодіжної аудиторії користувачів соціальних мереж стійких навичок цифрової безпеки та протидії соціальній інженерії.

На основі отриманих даних про критичні вразливості (зокрема, 24.5% ризику в сегменті імітації доменів та 21.1% нехтування протоколами шифрування), пропонується трирівнева модель рекомендацій: загальні, платформні, мережеві.

### **1. Загальносистемні заходи превентивної кібергігієни.**

Ці заходи спрямовані на формування фундаментальних навичок безпечної поведінки, що не залежать від конкретного програмного середовища:

- *динамічна верифікація автентичності ресурсів* – впровадження принципу «критичної паузи» перед здійсненням транзакційних дій або введенням облікових даних. Необхідно розвивати навичку візуального аудиту URL-структури для виявлення тайпосквотингу та гомографічних атак (заміна символів схожими за накресленням);

- *перехід до стійких методів мультифакторної автентифікації (MFA)* – враховуючи вразливість SMS-кодів до перехоплення через AiTM-проксі, рекомендовано пріоритезацію апаратних засобів (U2F/FIDO2) або програмних генераторів одноразових паролів (TOTP), що функціонують локально на пристрої користувача;

- *використання менеджерів паролів як технічних фільтрів* – застосування спеціалізованого ПЗ для зберігання паролів виконує роль автоматизованого детектора фішингу, оскільки такі системи блокують автозаповнення форм на доменах, що не збігаються з еталонним записом у базі.

*Мінімізація цифрового сліду (Anti-OSINT стратегія)* – свідоме обмеження публікації метаданих, геолокацій та персональних відомостей, які можуть бути викори-

стані соціальними інженерами для побудови сценаріїв «претекстингу» (створення вигаданої ситуації для отримання довіри).

## **2. Платформно-орієнтовані заходи безпеки.**

Враховуючи архітектурні особливості соціальних мереж, виявлених під час дослідження як пріоритетні, заходи захисту мають бути адаптовані під їхній специфічний інструментарій.

*Сегмент месенджерів (на прикладі Telegram).*

Конфігурація приватності метаданих – повне приховання номера телефону та обмеження прав на додавання до групових чатів категорією «Мої контакти». Це нівелює вектор атаки через автоматизовані скрипти масового спаму;

*активація двоетапної перевірки (Cloud Password)* – створення додаткового фактора захисту на рівні сервера месенджера, що є критично важливим для протидії викраденню сесійних токенів.

*Сегмент візуальних соцмереж (на прикладі Instagram).*

*Верифікація історії облікових записів* – використання інструментів внутрішнього аудиту («About this account») для перевірки частоти зміни імені користувача та географії входу, що дозволяє ідентифікувати акаунти, захоплені внаслідок атак АТО (Account Takeover);

*обмеження вхідної взаємодії* – Налаштування фільтрації Direct Messages та коментарів за ключовими словами-тригерами соціальної інженерії (наприклад, «giveaway», «verification», «support»), що знижує ймовірність первинного контакту зі зловмисником.

*Сегмент алгоритмічних платформ (на прикладі TikTok).*

Критична фільтрація контентного впливу – Розвиток навичок розпізнавання дипфейків (Deepfakes) та маніпулятивних відео, що поширюються під виглядом експертного контенту з метою перенаправлення користувача на зовнішні фішингові ресурси;

*заборона крос-платформної авторизації* – уникнення використання функції «Увійти за допомогою...» на неперевіраних сервісах, що запобігає каскадному витоку даних між різними соціальними профілями.

Запропонований комплекс заходів базується на переході від реактивного захисту (боротьба з наслідками) до цифрової стійкості. Освітньо-поведінкова модель, інтегрована в навчальний процес студентів та курсантів, дозволяє сформувавши «суб'єктивний бар'єр безпеки», який є ефективним навіть у випадках, коли технічні засоби захисту виявляються безсилими перед новими методами соціальної інженерії.

## **3. Заходи безпеки при використанні публічних та незахищених мереж передачі даних (Wi-Fi)**

Окремим вектором вразливості молодіжної аудиторії є використання безкоштовних публічних точок доступу Wi-Fi у закладах освіти, кафе та транспорті. Враховуючи, що 21.1% респондентів не звертають уваги на відсутність шифрування (протокол http), ризик перехоплення трафіку стає критичним. Рекомендується впровадження таких стратегій:

*Примусова інкапсуляція трафіку (VPN-технології).* Використання надійних VPN-сервісів (Virtual Private Network) при підключенні до будь-яких публічних мереж. Це створює захищений тунель, який унеможливує зчитування сесійних токенів та паролів, навіть якщо зловмисник контролює точку доступу (атака типу "Evil Twin").

*Деактивація функцій автоматичного підключення.* Налаштування мобільних пристроїв на ручне підтвердження кожного з'єднання. Це запобігає автоматичній авторизації смартфона у підроблених мережах зловмисників, які імітують відомі публічні назви (наприклад, "Free\_WiFi\_University").

*Гігієна транзакційних дій.* Встановлення суворої заборони на здійснення фінансових операцій, вхід у поштові скриньки чи соціальні мережі під час перебування у захищених мережах. Публічний Wi-Fi має використовуватись виключно для споживання неперсоналізованого контенту.

*Контроль сертифікатів безпеки.* Розвиток навички ігнорування ресурсів, що викликають попередження браузера про недійсні SSL-сертифікати. В умовах АіТМ-атаки зловмисник часто намагається підмінити оригінальний сертифікат сайту власним, що є ключовим маркером небезпеки.

**Висновки.** Результати проведеного дослідження засвідчили, що:

- соціальна інженерія залишається одним із найбільш ефективних векторів атак. Використання психологічних маніпуляцій та емоційного тиску дозволяє зловмисникам успішно атакувати різні групи населення. Молодь є найбільш масовою групою користувачів соціальних мереж і їх акаунти досить часто попадають під дію атак злочинців;
- атаки типу АіТМ становлять велику небезпеку, оскільки дозволяють зловмисникам обійти мультифакторну автентифікацію шляхом перехоплення сесійних токенів у реальному часі, перенаправляючи трафік від користувача до легітимного сервера через власний проксі-сервер.

Отримані результати дослідження підтверджують, що в умовах постійного зростання кіберзагроз, захист інформаційного простору вимагає переходу від базових методів захисту до динамічних моделей захисту, що завжди змінюється. Запропоновані загальносистемні, платформно-орієнтовані та мережеві заходи безпеки формують комплексну стратегію захисту. Вона спрямована не лише на технічне блокування загроз, а й на трансформацію поведінкових патернів користувача, що в умовах динамічної еволюції кіберзлочинності є найбільш ефективним інструментом забезпечення національної та особистої безпеки в інформаційному просторі.

Перспектива подальших досліджень полягає у розробці ефективних алгоритмів виявлення соціально-інженерних атак та реалізації освітніх програм з кібергігієни для найвразливіших верств населення – дітей та людей літнього віку оскільки їхній рівень цифрової грамотності і стійкості значно нижчий за інших.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Соцмережі 2026: важлива статистика для комунікацій НУО. *Громадський простір*. URL: <https://www.prostir.ua/?kb=sotsmerezhi-2026-vazhlyva-statystyka-dlya-komunikatsij-nyo> (дата звернення: 22.02.2026)

2. Khalil M. The Human Hack: 2025 Social Engineering Statistics, Trends, and Future Threats. *DeepStrike*. URL: <https://deepstrike.io/blog/social-engineering-statistics-2025> (дата звернення: 25.02.2026).
3. Bullée, J.W.H., Montoya, L., Pieters, W. et al. The persuasion and security awareness experiment: reducing the success of social engineering attacks. *Journal of Experimental Criminology*. 2015. Vol. 11, №1. Pp. 97–115. URL: <https://doi.org/10.1007/s11292-014-9222-7>
4. Groš S. Social engineering warfare as a tactic of information warfare. *European Integration Studies*. 2024. Vol. 20, №2. Pp. 67–86. URL: <https://doi.org/10.46941/2024.2.3>
5. Social Engineering. Glossary, Computer Security Resource Center. Information Technology Laboratory. NIST. URL: <https://deepstrike.io/blog/social-engineering-statistics-2025> (дата звернення: 28.02.2026).
6. Бондаренко І. С. Контroversійність концепту «соціальний інжиніринг» в умовах суспільно-політичних потрясінь. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського*. Серія: Філологія. Журналістика. 2025. Том 36 (75). № 1. Частина 2. С. 293-299. <https://doi.org/10.32782/2710-4656/2025.1.2/47>
7. Половенко Л. П., Мерінова С. В. Виявлення ознак соціальної інженерії та технологія протидії соціальним хакерам на підприємстві. *Підприємництво та інновації*. 2019. № 10. С. 183–187. URL: <https://doi.org/10.37320/2415-3583/10.28>
8. Про основні засади забезпечення кібербезпеки України: Закон України від 05.10.2017 № 2163-VIII: станом на 20.02.2026. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text> (дата звернення: 28.02.2026).
9. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 14 травня 2021 року «Про Стратегію кібербезпеки України»: Указ Президента України від 26 серпня 2021 року № 447/2021: станом на 05.03.2026. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/447/2021#Text> (дата звернення: 05.03.2026).

#### REFERENCES

1. Sotsmerezhi 2026: vazhlyva statystyka dlia komunikatsii NUO [Social Media 2026: Important Statistics for NGO Communications] (2026). Hromadskyi prostir. Retrieved from <https://www.prostir.ua/?kb=sotsmerezhi-2026-vazhlyva-statystyka-dlya-komunikatsij-nuo> [in Ukrainian].
2. Khalil M. (2025). The Human Hack: 2025 Social Engineering Statistics, Trends, and Future Threats. *DeepStrike*. Retrieved from <https://deepstrike.io/blog/social-engineering-statistics-2025> [in English].
3. Bullée, J.W.H., Montoya, L., Pieters, W. et al. (2015). The persuasion and security awareness experiment: reducing the success of social engineering attacks. *Journal of Experimental Criminology*. Vol. 11, №1. Pp. 97–115. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s11292-014-9222-7> [in English].
4. Groš S. (2024). Social engineering warfare as a tactic of information warfare. *European Integration Studies*. Vol. 20, №2. Pp. 67–86. Retrieved from <https://doi.org/10.46941/2024.2.3> [in English].

5. Social Engineering. Glossary, Computer Security Resource Center. Information Technology Laboratory (2025). *NIST*. Retrieved from <https://deepstrike.io/blog/social-engineering-statistics-2025> [in English].
6. Bondarenko, I. S. (2025). Kontroversiiniist kontseptu «sotsialnyi inzhynirynh» v umovakh suspilno-politychnykh potriasin [The controversial nature of the concept of "social engineering" in times of socio-political upheaval]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriia: Filolohiia. Zhurnalistyka*. Vol. 36 (75). #1. Part 2. Pp. 293-299. <https://doi.org/10.32782/2710-4656/2025.1.2/47> [in Ukrainian].
7. Polovenko L. P. & Merinova S. V. (2019). Vyivlennia oznak sotsialnoi inzhenerii ta tekhnolohiia protydyi sotsialnym khakeram na pidpriumstvi [Identifying signs of social engineering and technology to counter social hackers in the enterprise]. *Pidpriumnytstvo ta innovatsii*. №10. Pp. 183-187. <https://doi.org/10.37320/2415-3583/10.28> [in Ukrainian].
8. Pro osnovni zasady zabezpechennia kiberbezpeky Ukrainy: Zakon Ukrainy 05 zhovtnia .2017 roku № 2163-VIII [Law of Ukraine on the Basic Principles of Ensuring Cybersecurity in Ukraine from October 5 2017, № 2163-VIII]. (2017, October 5). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text> [in Ukrainian].
9. Pro rishennia Rady natsionalnoi bezpeky i oborony Ukrainy vid 14 travnia 2021 roku «Pro Stratehiiu kiberbezpeky Ukrainy» [On the decision of the National Security and Defense Council of Ukraine of May 14, 2021 “On the Cybersecurity Strategy of Ukraine”]: Ukaz Prezydenta Ukrainy vid 26 serpnia 2021 roku № 447/2021. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/447/2021#Text> [in Ukrainian].

Received 20.04.2026.  
Accepted 24.04.2026.  
Published 30.04.2026

### ***Youth cyberhygiene on social platforms: from analysis of aitm attacks to models of safe behavior***

*Abstract. This article presents a comprehensive study of the risks faced by young people in today's social media environments. The relevance of the study stems from the rapid development of social engineering methods, which are predominantly based on psychological manipulation. A classification of social networks by user age groups is presented, which has enabled the identification of priority attack vectors for each platform. Based on an empirical survey, critical gaps in young people's digital literacy have been identified: it was found that a significant proportion of respondents are vulnerable to Adversary-in-the-Middle (AiTM) attacks due to an inability to recognise fake domains, as well as ignoring the absence of data encryption protocols. The mechanics of session token interception and subsequent account takeover have been analysed in detail.*

*The practical significance of the study lies in the development of a three-tier protection model, which includes system-wide, platform-specific (Telegram, Instagram, TikTok) and network-related (Wi-Fi security) recommendations. The proposed educational and behavioural approach shifts the focus from purely technical protection measures to fostering active digital resilience in users.*

*Keywords: social engineering, social networks, cyber hygiene, AiTM (Adversary-in-the-Middle) attack, account takeover, phishing, user vulnerability, digital resilience.*

**Лучик Світлана Дмитрівна** - професорка кафедри інформаційних систем та технологій Харківського національного університету внутрішніх справ, доктор економічних наук, професор.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0757-1140>

**Мудрицький Ігор Володимирович** - курсант Харківського національного університету внутрішніх справ.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-9105-0648>

**Мойко Олександр Олександрович** - курсант Харківського національного університету внутрішніх справ.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-3828-6196>

**Стецик Роман Мирославович** - курсант Харківського національного університету внутрішніх справ.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-1263-184X>

**Luchy Svitlana Dmytrivna** – Professor of the Department of Information Systems and Technologies of the Kharkiv National University of Internal Affairs, Doctor of Economic Sciences, Professor.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0757-1140>

**Mudrytskyi Ihor Volodymyrovych** – Cadet of the Kharkiv National University of Internal Affairs.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0005-9105-0648>

**Moiko Oleksandr Oleksandrovyh** – Cadet of the Kharkiv National University of Internal Affairs.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-3828-6196>

**Stetsyk Roman Myroslavovich** – Cadet of the Kharkiv National University of Internal Affairs.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-1263-184X>

## ПРИНЦИПИ ТА РІШЕННЯ СТВОРЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ЖИВЛЕННЯ ТА ВИМІРЮВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПЛАЗМОВИХ АКТУАТОРІВ

*Анотація.* Для забезпечення контрольованого та стабільного діелектричного бар'єрного розряду при роботі плазмового актуатора потрібен як відповідний пристрій генерації високої різниці потенціалів з можливістю керування значенням потенціалу та частоти, так і спеціальна вимірвальна техніка, здатна працювати в цих умовах.

*В статті розглянуто конструкцію регульованого джерела високої змінної напруги з регулюванням частоти та можливістю вимірювати вихідний струм та напругу.*

*Проведено серію лабораторних досліджень на працездатність всіх її елементів та модулів. Конструкція показала свою працездатність і може бути використана в серії лабораторних досліджень з керування плазмових актуаторів.*

*Ключові слова:* high voltage power supply, plasma actuator, Dielectric Barrier Discharge (DBD).

**Постановка проблеми.** Перспективні напрями розвитку авіаційної техніки вимагають використання нетрадиційних методів впливу на аеродинамічний потік. Одним з таких методів є використання плазмових актуаторів [1–3]. Як теоретичні дослідження, так і експериментальна випробування демонструють можливість поширення діапазону ламінарної течії, збільшення кута атаки без зриву потоку та множини інших явищ [4,5]. Теоретичні методи моделювання цієї складної системи отримали суттєвий розвиток [1,3,6]. При цьому слід відмітити як різноманітність факторів у процесі моделювання, так і велику кількість ресурсів, які потрібні для процесу моделювання. Не менш суттєва кількість ресурсів потрібна і для експериментальних досліджень в цьому напрямку [5,6], враховуючи як різноманітність явищ, що проявлять себе в цих процесах, так і суттєву різницю у характерних часових інтервалах, притаманних процесам, що потребують дослідження.

Для забезпечення контрольованого та стабільного діелектричного бар'єрного розряду потрібен відповідний пристрій генерації високої різниці потенціалів з можливістю керування значенням потенціалу та частоти, а також спеціальна вимірвальна техніка, яка здатна працювати в цих умовах. Тому задача створення керованої високовольтної системи живлення для дослідження діелектричного бар'єрного розряду є актуальною.

### Методи та матеріали.

**Модуль для вимірювання високої напруги високої частоти.** Для того щоб вимірювати безпечно високу напругу високої частоти було розроблено модуль, який представлено на рис. 1. Цей модуль з зовнішнім резистором номіналом в  $1\text{ G}\Omega$  дозволяє вимірювати напругу в діапазоні  $0 - 15\text{ kV}$ . При цьому розроблений модуль може вимірювати як змінну, так і постійну високу напругу. Максимальна частота на якій він може працювати  $100\text{ kHz}$ . На максимальну частоту впливає його 2 параметри, а саме – смуга пропускання та вхідна ємність.

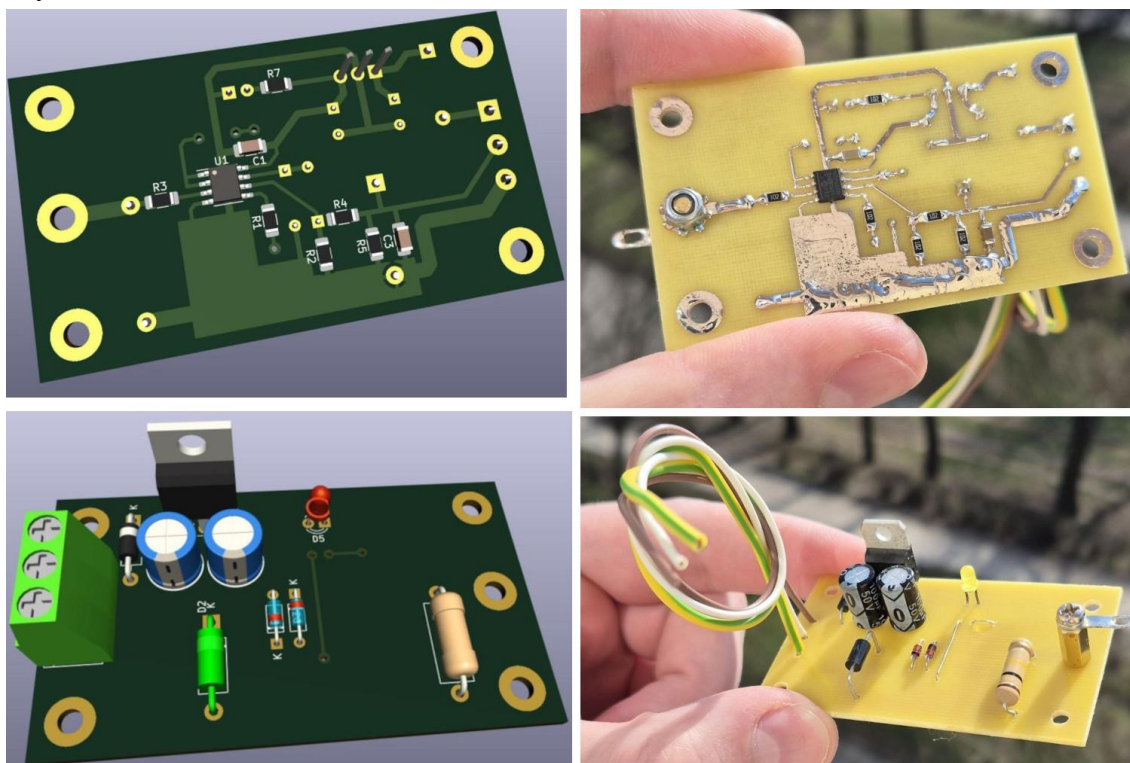


Рисунок 1 – Модуль для вимірювання високої напруги високої частоти

На виході модуля вже безпечна напруга, яку можна вимірити за допомогою мультиметру або ЦАП. Залежність перетворення вхідної напруги до вихідної  $10\text{ kV}$  на  $1\text{ V}$ , тобто на кожний  $1\text{ kV}$  напруги на виході буде  $0.1\text{ V}$ .

Схема модулю представлено на рис. 2. Основою схеми цього модулю є операційний підсилювач – МСР6002. Його вибір обумовлений малою вхідною ємністю за рахунок вхідного каскаду на польових транзисторах, а також смугою пропускання до  $1\text{ MHz}$ . Оскільки для дослідів цей модуль буде використовуватись на частотах до  $100\text{ kHz}$ , параметри цього операційного підсилювача є достатніми. Цей операційний підсилювач потребує живлення  $5\text{ V}$ . Для їх забезпечення використано стабілізатор LM7805 та конденсатори C2, C4, C1, а також діод D4 для захисту від неправильної полярності живлення.

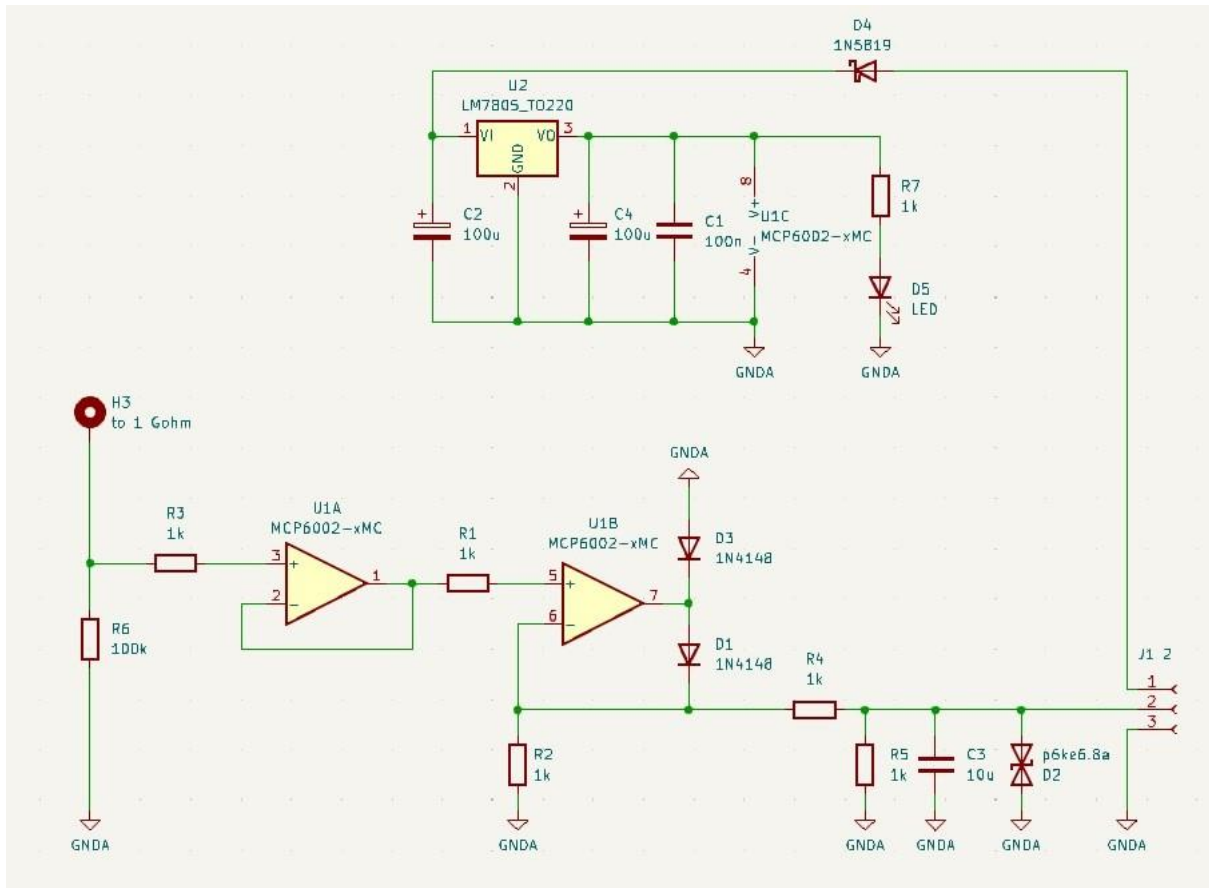


Рисунок 2 – Схема модуля для вимірювання високої напруги високої частоти

Висока напруга, як постійна, так і змінна поступає через зовнішній резистор номіналом в  $1\text{ G}\Omega$ , який знаходиться на ізольованих стійках та після припаювання покривається уретановим лаком. Резистор в  $1\text{ G}\Omega$  разом з резистором  $R_6$  номіналом в  $100\text{ k}\Omega$  утворює резистивний дільник напруги. Для зменшення впливу вхідного опору системи вимірювання, враховуючи великий вихідний опір цього дільника використано буфер на операційному підсилювачі. Цей буфер компенсує вихідний опір дільника напруги і дозволяє з меншою похибкою вимірювати цей сигнал. Резистори  $R_3$  та  $R_1$  використовуються для придушення самозбудження і генерацій, вони працюють як фільтр низької частоти з вхідною ємністю операційного підсилювача. На другому операційному підсилювачі побудовано схему «ідеального» напівперіодного випрямлення.

У багатьох пристроях обробки аналогових сигналів, наприклад у вимірювальних схемах, необхідно виділення або складових тільки однієї полярності (однопівперіодне випрямлення), або визначення абсолютного значення сигналу (двонапівперіодне випрямлення). Ці операції можуть бути реалізовані на пасивних діодно-резистивних ланцюгах, але відносно велике пряме падіння напруги на діодах ( $0.3 - 1\text{ V}$ ) і нелінійність їх вольт-амперних характеристик вносять в цьому випадку значні похибки, особливо при обробці слабких сигналів. Тому також застосування операційних підсилювачів дозволяє значною мірою послабити вплив реальних характеристик діодів.

Схема напівперіодного випрямлення на операційному підсилювачі включає в себе сам операційний підсилювач, 2 швидкодіючі діоди  $D_1$  та  $D_3$  типу 1N4148 та резистор

R2. Для калібрування по зразковому вимірювачу напруги є вихідний дільник на резисторах R4 та R5. Конденсатор 3 разом з резистором R4 утворює фільтр низької частоти на якому формується постійна напруга для подальшого вимірювання зовнішнім ЦАП або мультиметром. Для захисту пристроїв вимірювання, що буде поєднано до виходу модулю використано двонапрявлений супресор P6KE6.8A.

Оскільки вимірювання відбувається відносно великої напруги і використовується досить великий опір верхнього плеча дільника напруги по входу буферу не ставиться захист у вигляді діодної виделки або стабілітронів або супресорів. Справа в тому, що їх струм витoku призводить до суттєвих похибок у вимірах. Також їх ємність додається до вхідної операційного підсилювача, що зменшує максимальну можливу частоту виміру. Також плата цього модуля обов'язкова має бути ретельно вимита від флюсу і покрита ізоляційним лаком з 2 сторін.

Розглянутий модуль було перевірено на напрузі до 12 kV, на частотах від 10 до 60 kHz. Вимірювання показали працездатність схеми.

**Модуль для вимірювання змінного високочастотного струму під високою напругою.** Для вимірювання змінного високочастотного струму під високою напругою було прийнято рішення використовувати трансформатор струму. Його використання має для задачі вимірювання струму високої напруги велику перевагу – гальванічну розв'язку.

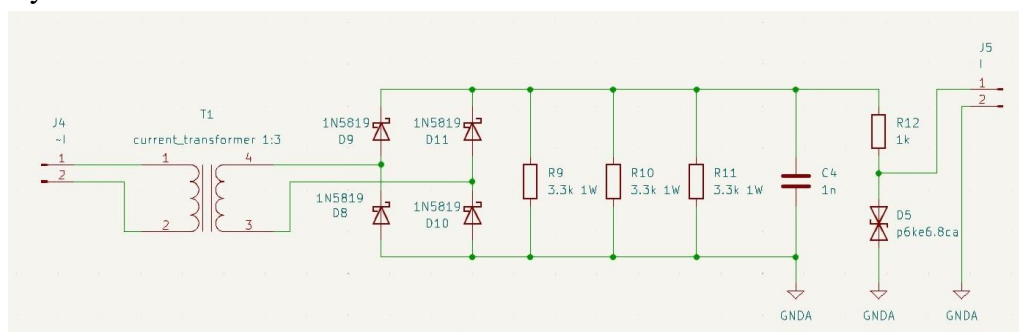


Рисунок 3 – Схема модулю для вимірювання змінного струму під потенціалом високої напруги

Схема модулю представлено на рис. 3. Її основою є трансформатор струму з коефіцієнтом трансформації 1 до 3. Далі для випрямлення використано діодний місток на діодах Шотткі 1N5819 та шунт навантаження трансформатору струму. Шунт складається з 3 резисторів R9, R10 та R11, які стоять паралельно для збільшення сумарної потужності. Також паралельно їм стоїть конденсатор C4 для придушення шумів. Для захисту від перенапруги вимірюючих приладів, що під'єднуються до модулю, використано резистор R12 та супресор P6KE6.8A.

Модуль побудовано на платі з склотекстоліту товщиною 5 мм, при тому усі деталі закріплені на монтажних стійках. Сам трансформатор струму виконано із феритового кільця марки N78 (рис. 4). Достатньо великий розмір (зовнішній діаметр 30 мм) було обрано як для того, щоб встановити достатню електричну ізоляцію фазного дроту висковольтної обмотки, а також для зменшення можливості насичення.

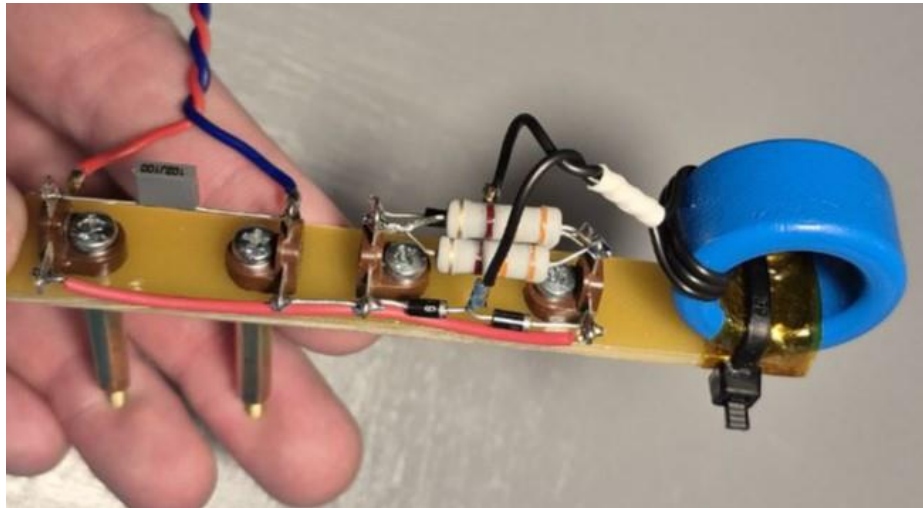


Рисунок 4 – Модуль вимірювання змінного струму під потенціалом високої напруги

Модуль було перевірено на напрузі до 12 kV, на частотах від 10 до 60 kHz. При цьому вимірювався струм на резисторах 1, 5, та 10 МΩ, які забезпечували навантаження, притаманне обраному розміру плазменного актуатора. Схема показала працездатність, при цьому максимальний струм сягав був 3 mA.

**Регульоване джерело високої напруги з можливістю регулювання частоти.** Для дослідів було необхідно джерело змінної високої напруги, що при цьому може змінювати і частоту. Також було важливо, щоб вихідний сигнал був близький до синусу, тому було обрано топологію push-pull, з фіксованим коефіцієнтом заповнення 50%. Меандр після великої індуктивності вторинної високовольтної обмотки виглядає досить близько до гармонічного сигналу.

Схема, яку представлено на рис. 5, побудовано на сучасному PWM контролеру SG3524, який в схемі окрім керування ключами бере на себе ще й функції захисту.

В якості високовольтного трансформатора використано трансформатор рядкової розгортки електро-променевого монітору. Параметри його обмоток дають можливість отримати змінну напругу до 10 kV. Первинна обмотка (2 напів обмотки по 6 витків) мотається на феритовому сердечнику дротом 1 mm.

Для комутації первинної обмотки з середньою точкою використано два польових MOSFET транзистора IRF3205. Для зменшення паразитних коливань при перемиканні ключів паралельно стоку та істоку транзисторів стоять снаберні ланцюги із резисторів і конденсаторів C9, C10 та резисторів R18 та R19 відповідно. Затвори транзисторів підтягнуті до потенціалу землі резисторами 1.2 kΩ. Послідовно з затворами стоять резистори R13, R14 10 Ω. Значення їх опору підібрано під найкращу форму сигналу на затворах. Також вони виконують функцію захисту драйверу.

В якості драйверу польових транзисторів було обрано IR4427, так як цей драйвер за рахунок досить значного максимально вихідного струму в 6 A може легко відкривати та закривати затвори IRF3205 з ємністю 3.2 nF. Також в драйвері є UVLO захист, тому транзистори відкриваються напругою, що забезпечує їх ключовий режим.

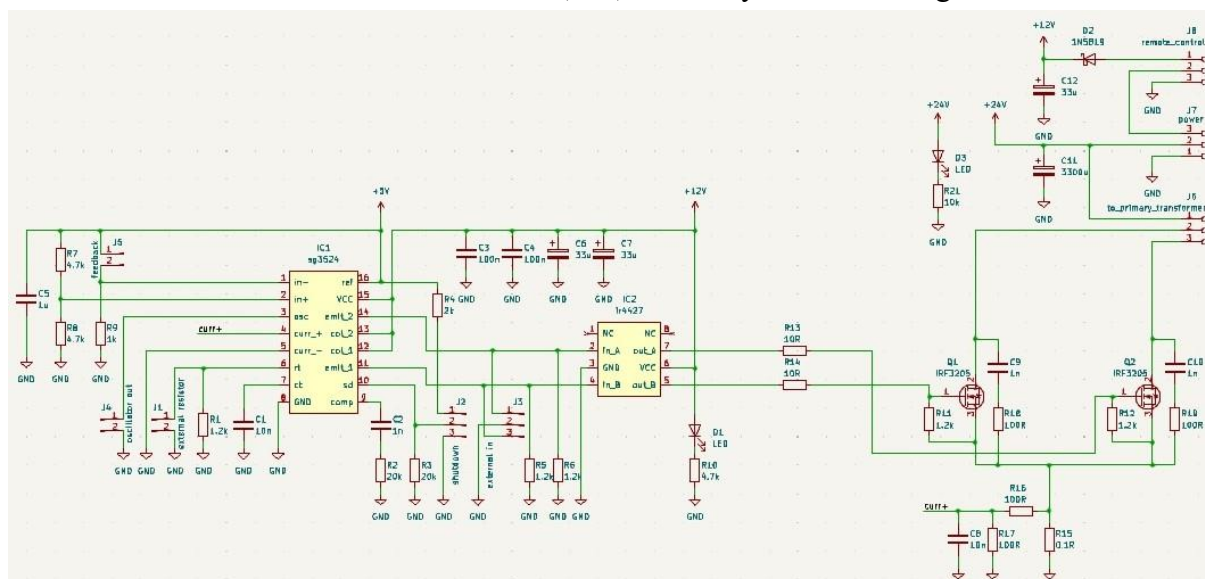


Рисунок 5 – Схема регульованого джерела змінної високої напруги з можливістю регулювання частоти

Захист від занадто високого рівня струму через ключі побудовано на PWM контролеру SG3524 та його штатному компараторі перевищення струму. Сигнал на його компаратор береться з шунта R15 0.1  $\Omega$ , через який під'єднано транзистори до потенціалу землі. Для встановлення потрібного струму спрацювання захисту стоїть також дільник на резисторах R16 та R17. Ними можна виставити бажаний струм спрацювання. Конденсатор C8 та резистор R16 виконують функцію фільтра низької частоти для придушення шуму у сигналі, що йде на «компаратор струму» SG3524.

За рахунок резисторів R7 та R8 виставлено фіксований коефіцієнт заповнення 50%, проте в схемі залишена можливість зробити регулювання цього параметра по виводу «feedback».

Для захисту схеми від перегріву транзисторів, а також для того щоб можна було зробити зовнішні схеми захисту використано спеціальний вивід SG3524 – «shutdown». При подачі логічного сигналу 5 V на вивід, контролер вимикає подачу сигналів керування ключів.

Регулювання частоти зроблено за рахунок змінного багато обертового резистору номіналом 10 k $\Omega$  в ланцюзі RC генератору, та резисторів, що обмежують повний діапазон змін. Для цієї задачі налаштування частоти реалізовано в діапазоні 10 – 60 kHz.

Регулювання вихідної високої напруги робиться за рахунок змінення напруги шини живлення силової топології push-pull. Для цього використано стандартний асинхронний buck конвертор на мікросхемі XL4016E.

Плату регульованого джерела змінної високої напруги з можливістю регулювання частоти представлено на рис. 6. При зміні напруги шини живлення силової топології push-pull від 1.25 – 30 V на виході трансформатора напруга змінювалась у діапазоні 0 – 8 kV під навантаженням резисторів 5 M $\Omega$  та 10 M $\Omega$ , якими схема показала свою працездатність.

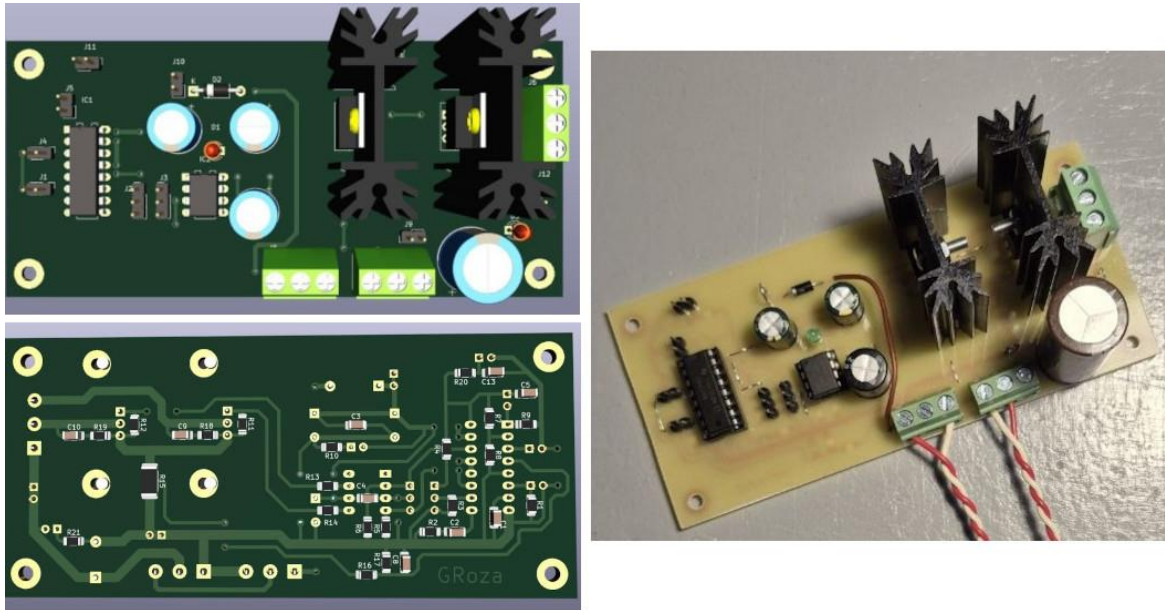


Рисунок 6 – Регульоване джерело змінної високої напруги з можливістю регулювання частоти

**Особливості під'єднання землі.** Оскільки конструкція видає напругу 0 – 8 kV, треба було для збільшення безпеки під час дослідів зменшити кількість небезпечних виводів, тому початок намотки вихідної обмотки трансформатора було поєднано з загальним мінусом всієї схеми і виводом заземлення всієї конструкції. Таким чином в конструкції залишився небезпечним тільки один фазний вивід. Це дозволяє зменшити як вірогідність виходу з ладу систем керування та вимірювання, а також підвищує рівень безпеки.

**Тестові запуски макету.** Перші запуски макету регульованого джерела високої змінної напруги з регулюванням частоти та можливістю вимірювати вихідний струм та напругу представлено на рис. 7.

На рис. 7 можна побачити 2 джерела живлення. Одне джерело на 12 V – використовується у схемі керування push-pull, кулерах охолодження (на фотографії не встановлені). Інше джерело – 30 V, забезпечує живлення асинхронного buck конвертора на мікросхемі XL4016E, що дозволяє керувати напругою силової push-pull. Зверху зліва можна побачити високовольтний трансформатор та модулі вимірювання напруги і струму, що встановлені разом з ним.

Оскільки макет було створено для дослідів з керування плазмовими актуаторами було під'єднано один з плазмових актуаторів в якості навантаження (рис. 8). При регулюванні живлення шини push-pull, а також частоти імпульсів PWM контролеру SG3524 було відмічено зміну вигляду бар'єрного розряду.

До регульованого джерела високої змінної напруги, з регулюванням частоти та можливістю вимірювати вихідний струм та напругу буде також під'єднано програмно апаратну систему для керування та збору даних, але це тема для окремої розробки.

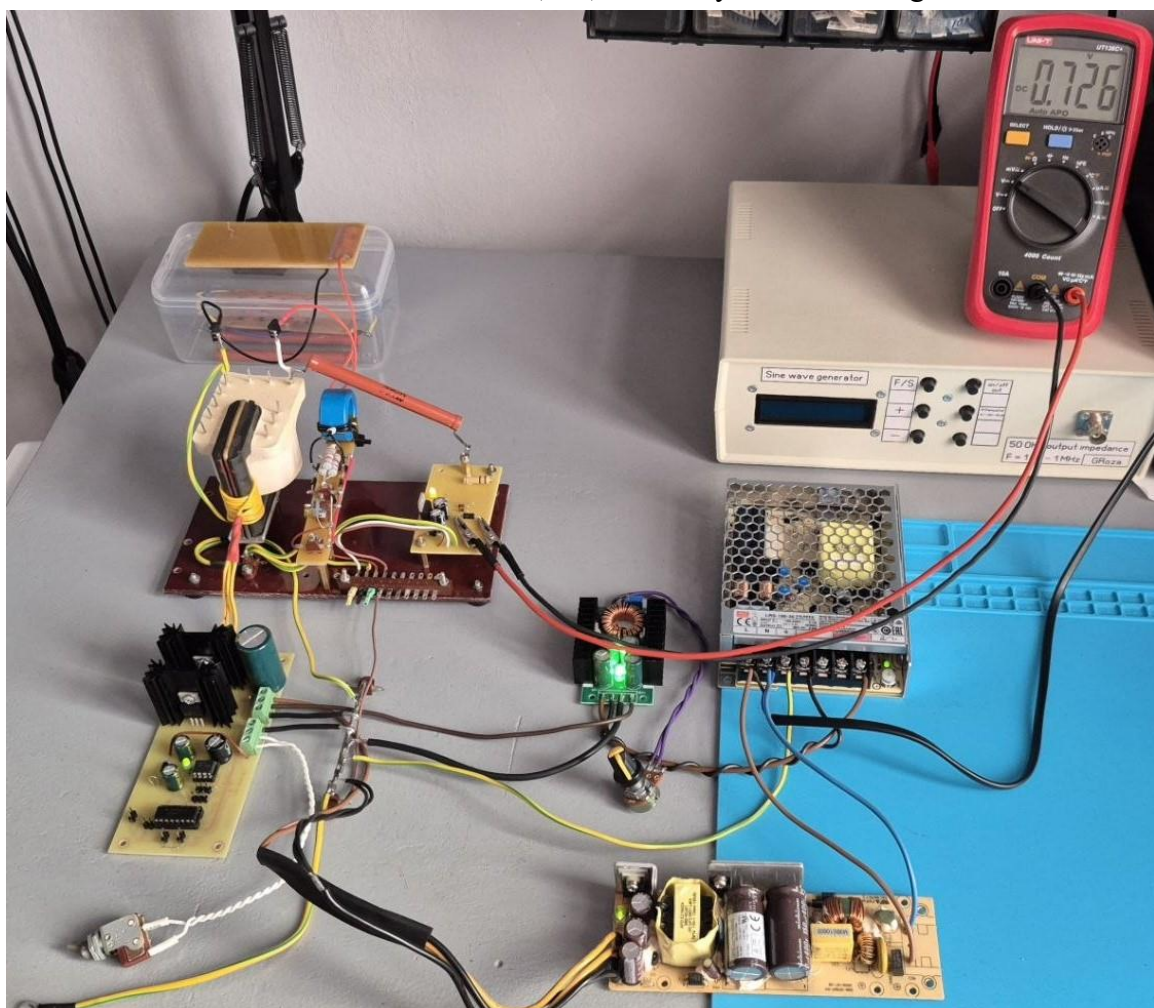


Рисунок 7 – Макет регульованого джерела високої змінної напруги з регулюванням частоти та можливістю вимірювати вихідний струм та напругу

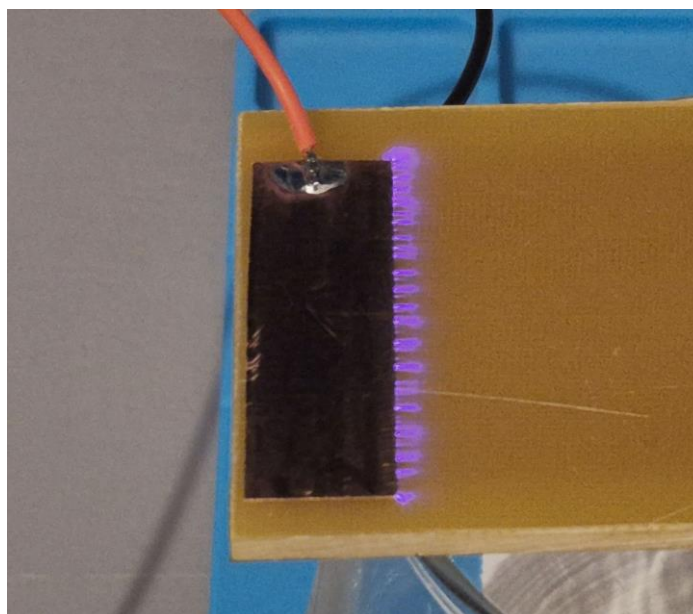


Рисунок 8 – Навантаження макету регульованого джерела високої змінної напруги плазмовим актуатором

**Висновки.** Розглянута та описана у статті конструкція регульованого джерела високої змінної напруги з регулюванням частоти може забезпечити контрольований та стабільний бар'єрний плазменний розряд, що потрібен для подальших досліджень плазмових актуаторів.

Проведено серії лабораторних досліджень на працездатність всіх її елементів та модулів. Конструкція показала свою працездатність і може бути використана в серії лабораторних досліджень.

Спроектовано та створено. регульоване джерело змінної високої напруги, яке може видавати напругу від 0-8 kV при частотах у діапазоні 10-60 kHz. Модуль виміру змінної високої напруги може вимірювати напругу до 15 kV, на частотах до 100 kHz. Модуль виміру струму може вимірювати струм до 5 mA.

#### ЛІТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Plasma Actuators for Cylinder Flow Control and Noise Reduction Flint / O. Thomas, A. Kozlov, and Thomas C. Corke // AIAA Journal 2008 46:8, 1921-1931.
2. Optimization of the Aerodynamic Plasma Actuator as an Electrohydrodynamic (EHD) Electrical Device / J. Reece Roth and Xin Dai. // AIAA 2006-1203. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. January 2006.
3. Momentum Transfer for an Aerodynamic Plasma Actuator with an Imposed Boundary Layer / James Baughn, Christopher Porter, Brent Peterson, Thomas McLaughlin, C. Enloe, Gabriel Font and Corrie Baird., // AIAA 2006-168. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. January 2006.
4. Optical Observation of Discharge Plasma Structure in DBD Plasma Actuator / Yuji Takizawa, Atsushi Matsuda, Kousuke Kikuchi, Akihiro Sasoh and Takashi Abe. // AIAA 2007-4376. 38th Plasmadynamics and Lasers Conference . June 2007
5. Surface Potential and Electric Field Structure in the Aerodynamic Plasma Actuator / C. Enloe, T. McLaughlin, J. Gregory, R Medina and W Miller. // AIAA 2008-1103. 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit. January 2008.
6. Effects of Oxygen Content on the Behavior of the Dielectric Barrier Discharge Aerodynamic Plasma Actuator / G. Font, C. Enloe, J. Newcomb, A. Teague, A. Vasso and Thomas McLaughlin. // AIAA 2010-545. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. January 2010.

Received 20.04.2026.  
Accepted 24.04.2026.  
Published 30.04.2026

#### ***Principles and solutions for creating power and measurement equipment for plasma actuator research***

*Promising directions of development of aviation technology require use of non-traditional methods of influence on aerodynamic flow. One of such methods is use of plasma actuators. Both theoretical researches and experimental tests demonstrate possibility of expansion of range of laminar flow, increase of angle of attack without flow breakdown and set of other phenomena. Theoretical methods of modeling of this complex system have received significant development. At the same time it is necessary to note both variety of factors in modeling process, and large amount of resources which are required for modeling process.*

*No less significant amount of resources is required for experimental researches in this direction, taking into account both variety of phenomena which will manifest themselves in these processes, and significant difference in characteristic time intervals, inherent in processes which require research. To ensure a controlled and stable barrier plasma discharge, both an appropriate high-potential difference generation device with the ability to control the potential and frequency are required, as well as special measuring equipment capable of operating under these conditions. It is also necessary to take into account the limited technical and financial capabilities in the modern environment. Therefore, the task of creating a controlled high-voltage power supply system for barrier discharge research is relevant.*

*The article describes the design of a regulated high-voltage alternating voltage source, with frequency control and the ability to measure the output current and voltage. The schemes and their description, design features are given. A series of experiments were conducted to determine the operability of all its elements and modules. The design has shown its operability and can be used in a series of laboratory studies on the control of plasma actuators.*

*Key words: high voltage power supply, plasma actuator.*

**Зимогляд Андрій Юрійович** - доцент кафедри ІТС ННІ Дніпровського металургійного інституту Українського державного університету науки і технологій, к.т.н., старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7239-2467>

**Гуда Антон Ігорович** - професор кафедри ІТС ННІ Дніпровського металургійного інституту Українського державного університету науки і технологій, д.т.н., доц., провідний науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-1580>

**Редчиць Дмитро Олександрович** – д.ф.-м.н., професор, директор Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8538-6026>

**Zymoglyad Andrew Yuriyovych** - Associate Professor of the Department of ITS of the Dnipro Metallurgical Institute of the Ukrainian State University of Science and Technology, Ph.D., senior research fellow of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-7239-2467>

**Guda Anton Igorovich** - Professor of the Department of ITS of the Dnipro Metallurgical Institute of the Ukrainian State University of Science and Technology, Ph.D., Assoc. Prof., leading researcher of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1139-1580>

**Redchyts Dmytro Oleksandrovich** – Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Director of the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8538-6026>

А.Ю. Дукач, Г.В. Рудакова, В.М. Поліщук

## АНАЛІЗ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ ПЛОДООВОЧЕВИХ КОНСЕРВІВ У ВЕРТИКАЛЬНИХ АВТОКЛАВАХ

*Анотація.* У роботі проведено аналіз існуючих методів керування процесами термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах. Розглянуто проблеми використання традиційних пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів, зумовлені значною тепловою інерційністю об'єкта та складністю налаштування під різні типи і маси завантаження. Проаналізовано перспективні підходи до автоматизації, зокрема прогнозує керування на основі моделей (MPC), яке дозволяє оптимізувати процес безпосередньо за цільовим показником накопиченої мікробіологічної летальності ( $F_0$ ) з урахуванням технологічних обмежень. Окрему увагу приділено можливостям застосування інтелектуальних методів, таких як адаптивні нечіткі регулятори (Fuzzy-PID) та штучні нейронні мережі (ANN), що виконують функцію віртуальних "м'яких сенсорів" для прогнозування температури всередині тари. За результатами аналізу обґрунтовано необхідність переходу до гібридних інтелектуальних систем керування для забезпечення енергоефективності, компенсації нелінійності процесів теплообміну та збереження харчової цінності складноструктурної гетерогенної продукції.

*Ключові слова:* вертикальний автоклав, термічна обробка, ПІД-регулятор, прогнозує керування, нечітка логіка, штучні нейронні мережі, накопичена летальність, оптимізація керування.

**Постановка проблеми.** Процес консервації харчових продуктів спрямований на збереження їхньої якості та безпечності протягом тривалого часу. Основним завданням є запобігання розвитку мікроорганізмів і сповільнення біохімічних змін, що призводять до псування [1]. Саме термічна обробка в автоклавах забезпечує надійну стерильність та тривалий термін зберігання консервів без застосування штучних добавок [2]. Але цей процес є досить складним і потребує точного контролю температурних режимів та тривалості впливу. Недотримання оптимальних параметрів може призвести як до втрати поживних і смакових властивостей продукції, так і до загрози мікробіологічної небезпеки. Використання традиційних систем керування вертикальними автоклавами часто супроводжується значними енерговитратами, нерівномірністю теплових режимів та ризиками зниження якості кінцевого продукту. Саме тому важливим завданням є оптимізація комп'ютеризованих систем управління процесом термічної обробки плодоовочевих консервів з метою підвищення ефективності роботи обладнання, зменшення енерговитрат, забезпечення належної якості та безпечності готової продукції [3].

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Використовувані в промисловості автоклави являють собою складні високотехнологічні агрегати, що працюють із великою продуктивністю. В даний час існує багато різновидів автоклавів, є серед них спеціалізовані моделі, та, не дивлячись на це все, вони працюють за одним принципом: нагрів продукту, що піддається стерилізації, в фасованих ємностях до високої температури при певному тиску. Тиск має підвищене значення в порівнянні з атмосферним, в результаті чого запобігається руйнування (розрив) тари (посуду) за рахунок компенсації температурного розширення консервів, що нагріваються. Схему компонентів комплексу термічної обробки наведено на рис. 1.

Двома основними компонентами комплексу, що розглядається, є апарат періодичної дії (АПД) і контролер. Контролер надсилає об'єкту сигнали керування вентилями V1-V6, кришкою V7 і тельфером M1. Для керування об'єктом контролеру необхідно врахувати значення рівнів, температур, тиску та інтервалів часу [4].

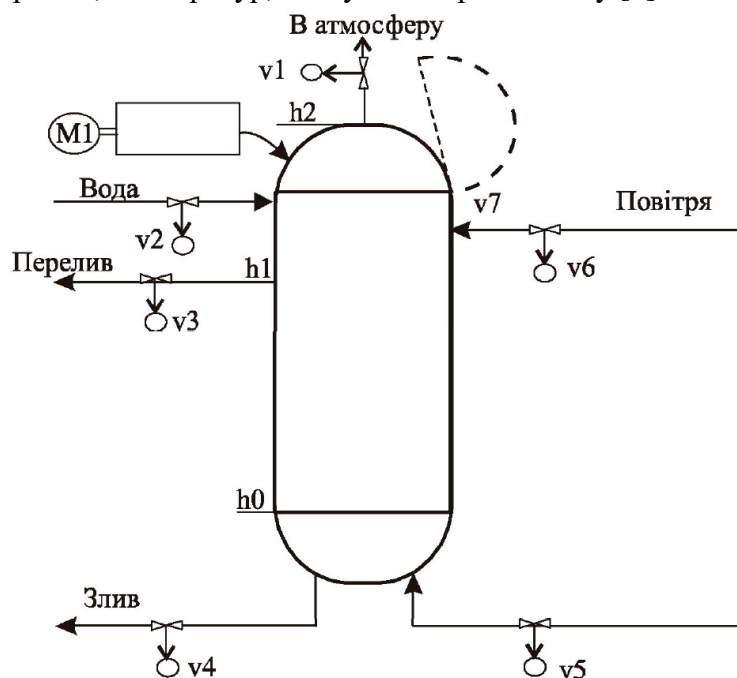


Рисунок 1 – Автоклав з протитиском

**Мета досліджень.** Метою дослідження є проведення аналізу методів керування процесів термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах та обґрунтування перспективних підходів до автоматизації для забезпечення енергоефективності, компенсації нелінійності процесів теплообміну та збереження харчової цінності складноструктурної гетерогенної продукції.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Системи керування процесами стерилізації та пастеризації у вертикальних автоклавах використовують комплексний підхід, що базується на поєднанні термодинамічного моделювання, класичних алгоритмів регулювання та інтелектуальних систем. Кожен з існуючих підходів має свої технологічні особливості, переваги та критичні обмеження щодо забезпечення необхідного

рівня летальності мікроорганізмів (коефіцієнт  $F_0$ ) при збереженні харчової цінності продукту.

1. Традиційні методи керування (PID-регулювання). Традиційні методи керування базуються на використанні пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів, які є промисловим стандартом для підтримання заданої температури та тиску в автоклаві. Дані методи ґрунтуються на безперервному обчисленні помилки між бажаною температурою середовища (уставки) та фактичною температурою, що вимірюється термодатчиками (РТ100 або термопарами).

Процес регулювання описується наступними базовими елементами та сигналами:

–  $r(t)$  (задавальний вплив) – уставка системи. У контексті даного дослідження це необхідна температура стерилізації плодоовочевих консервів (наприклад, 120 °С), яку має підтримувати автоклав згідно з технологічною картою;

–  $y(t)$  (вихідний сигнал) – фактична поточна температура в апараті, яка вимірюється датчиком і передається через лінію зворотного зв'язку;

–  $e(t)$  (сигнал похибки) – різниця між заданою температурою  $r(t)$  та фактичною температурою  $y(t)$ . Саме з цим відхиленням працює регулятор.

–  $u(t)$  (керуючий вплив) – загальний сигнал, який є сумою впливів усіх трьох ланок ПІД регулятора і подається на об'єкт керування. Загальне математичне рівняння має вигляд:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

де  $K_p$ ,  $K_i$  та  $K_d$  - коефіцієнти налаштування відповідних ланок регулятора (пропорційній, інтегральній та диференціальній).

Головною проблемою традиційних ПІД-регуляторів у контексті вертикальних автоклавів є значна теплова інерційність та нелінійність процесу. Завантажений плодоовочевими консервами автоклав має велику теплоємність. Оскільки класичний ПІД-регулятор налаштовується на фіксовані коефіцієнти ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$ ), він не може гнучко адаптуватися до зміни маси завантаження або типу консервів. Це часто призводить до перерегулювання або занадто повільного виходу на режим стерилізації, що збільшує енерговитрати та може погіршити органолептичні властивості (смак, колір) і харчову цінність продукту.

2. Прогнозуюче керування на основі моделей Model Predictive Control (MPC).

Метод MPC являє собою один із найбільш перспективних напрямків сучасної теорії автоматичного керування для складних теплотехнічних об'єктів. На відміну від класичних ПІД-регуляторів, які обчислюють керуючий сигнал лише на основі поточного відхилення температури, MPC використовує динамічну математичну модель автоклава для передбачення його поведінки в майбутньому на певний проміжок часу (горизонт прогнозування). Основна ідея алгоритмів предиктивного керування базується на принципі "ковзного горизонту" (receding horizon). На кожному такті часу контролер розв'язує задачу оптимізації в режимі реального часу. Він розраховує таку послідовність майбутніх керуючих впливів (наприклад, положень клапана подачі пари), яка б мінімі-

зувала спеціальну функцію цілі  $J$  (cost function). Типова квадратична функція цілі для мінімізації похибки температурного режиму автоклава має вигляд:

$$J = \sum_{i=1}^{H_p} w_y [y(t+i|t) - r(t+i)]^2 + \sum_{j=0}^{H_c-1} w_u [\Delta u(t+j|t)]^2, \quad (2)$$

де  $H_p$  – горизонт прогнозування (кількість кроків у майбутнє, на які математична модель передбачає зміну температури в апараті);  $H_c$  – горизонт керування (кількість кроків, для яких оптимізатор розраховує зміну стану виконавчих механізмів);  $y(t+i|t)$  – прогнозоване значення температури в автоклаві на  $i$ -му кроці;  $r(t+i)$  – задана технологічна траєкторія температури (ідеальний графік нагріву та стерилізації);  $\Delta u(t+j|t)$  – зміна керуючого впливу (наприклад, відсоток відкриття парового клапана);  $w_y, w_u$  – вагові коефіцієнти, що визначають компроміс між точністю підтримання заданої температури та плавністю роботи механізмів (мінімізацією зносу арматури та економією теплоносія).

Система розраховує цілий план дій на майбутнє ( $H_c$  кроків), але на виконавчий механізм подається лише перший крок цього плану. На наступному такті система отримує нові дані з датчиків, горизонт зсувається на один крок вперед, і весь процес оптимізації повторюється.

Критичною перевагою алгоритмів MPC для процесів консервування є їхня здатність системно враховувати жорсткі технологічні та апаратні обмеження прямо під час розрахунку функції  $J$ . Оптимізатор гарантує, що розрахований план керування не порушить фізичних меж:

- тиск в автоклаві не вийде за межі допустимого діапазону ( $P_{min} \leq P(t) \leq P_{max}$ ), що запобігає зриву кришок з банок;
- швидкість нагрівання ( $\Delta T/\Delta t$ ) не перевищить межі, при якій можливий термічний шок для скляної тари;
- ступінь відкриття клапанів лежить у фізично можливих межах від 0 до 100%.

На відміну від класичних ПД-регуляторів, які обмежуються жорстким підтриманням заданого графіка температури теплоносія (пари або води), системи прогнозного керування (MPC) дозволяють оптимізувати процес, орієнтуючись на головний кінцевий результат – мікробіологічну безпеку. Цільовою функцією в таких алгоритмах виступає накопичена летальність (стерилізуючий ефект)  $F_0$  (рис. 2), що обчислюється за рівнянням Бігалоу [5]:

$$F_0 = \int_0^t 10^{\frac{T(t) - T_{ref}}{z}} dt, \quad (3)$$

де  $T(t)$  – поточна температура в "найхолоднішій точці" (зазвичай геометричному центрі) банки з консервами в момент часу  $t$ , °C;  $T_{ref}$  – референсна температура (базова температура стерилізації, яка традиційно приймається рівною 121,1 °C);  $z$  – константа термостійкості цільових мікроорганізмів, що показує, на скільки градусів потрібно змінити температуру, щоб час відмирання бактерій змінився в 10 разів (наприклад, для спор збудника ботулізму *Clostridium botulinum*  $z = 10^\circ\text{C}$ ).

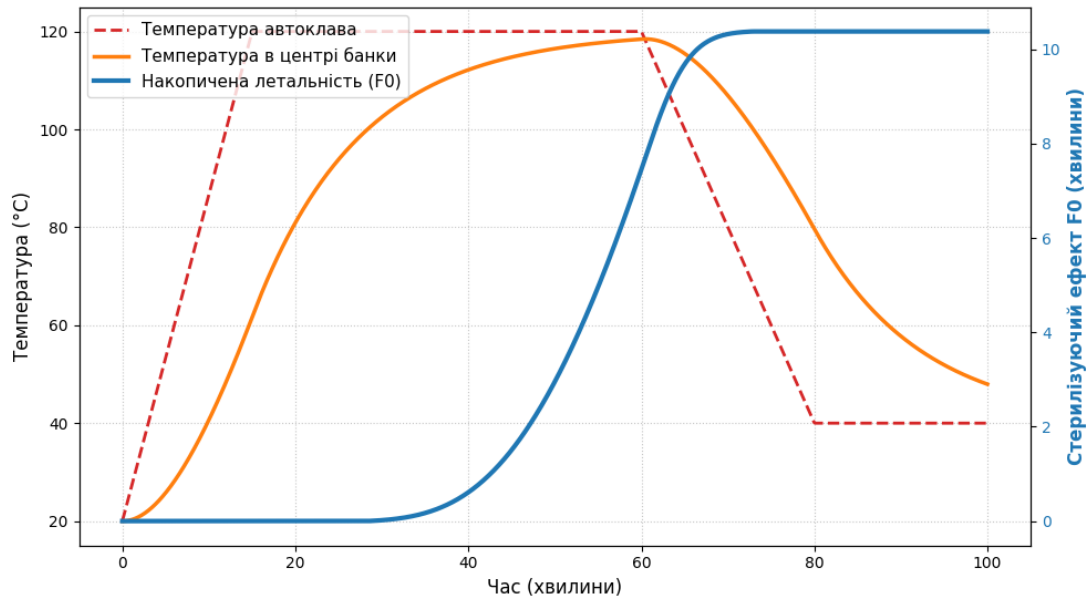


Рисунок 2 – Динаміка термічної обробки консервів та накопичення  $F_0$

Ключова проблема промислової стерилізації полягає в тому, що розмістити фізичні термодатчики в кожній банці під час реального виробництва неможливо. Тому метод MPC використовує теплофізичну математичну модель для "віртуального" розрахунку  $T(t)$  у режимі реального часу [6]. Алгоритм безперервно прогнозує, як тепло передається від середовища автоклава через стінку тари вглиб продукту.

Як тільки розрахунковий інтеграл  $F_0$  досягає нормативного значення (наприклад, необхідних 4-6 хвилин для конкретного виду плодоовочевих консервів), система автоматично подає сигнал на припинення подачі пари та ініціює фазу охолодження.

Такий підхід прямого керування за летальністю (Lethality-based control) має дві вагомі переваги порівняно з традиційними методами:

- енергоефективність: процес нагрівання не триває довше, ніж це мінімально необхідно для знезараження, що суттєво економить пару та електроенергію.
- збереження якості продукту: мінімізується термічна деградація поживних речовин. Уникнення "переварювання" дозволяє зберегти більше вітамінів (зокрема термолабільного вітаміну C) та покращує органолептичні властивості овочів (їхню структуру, колір та хрусткість).

### 3. Інтелектуальні методи (Нечітка логіка та Нейронні мережі).

Процес термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах характеризується високим ступенем нелінійності, нестаціонарністю теплофізичних параметрів (залежно від типу продукту: горошок, кукурудза тощо) та змінною масою завантаження. Для подолання цих проблем традиційні математичні моделі все частіше замінюються або доповнюються системами штучного інтелекту – нечіткою логікою та штучними нейронними мережами [7].

#### 1). Адаптивні нечіткі-PID регулятори.

Класичний ПД-регулятор має жорстко задані коефіцієнти налаштування. Натомість нечіткий регулятор використовує базу експертних знань для безперервної адаптації цих коефіцієнтів у режимі реального часу.

Робота такого регулятора складається з трьох основних етапів: фазифікація, База правил, дефазифікація.

1 етап. Фазифікація. Чіткі вхідні сигнали системи – поточна похибка  $e(t)$  та швидкість зміни похибки  $\Delta e(t)$  – перетворюються на лінгвістичні змінні.

Наприклад, замість точного значення відхилення "-5°C", система оперує поняттями: "Негативна Велика" (NB), "Негативна Мала" (NS), "Нуль" (ZE), "Позитивна Мала" (PS).

2 етап. База правил. Обробка даних відбувається за допомогою логічних правил "ЯКЩО-ТО". Наприклад:

ЯКЩО  $e(t)$  є Позитивною Великою (температура сильно не дотягує до норми) та  $\Delta e(t)$  є Нульовою (температура не зростає), ТО коефіцієнт  $K_p$  має бути Великим.

3 етап. Дефазифікація.

Перетворення логічних висновків назад у чіткий керуючий сигнал (наприклад, використовуючи метод центру ваги), що визначає точний відсоток відкриття парового клапана.

Такий підхід дозволяє системі керування автоклавом поводитися подібно до досвідченого оператора, плавно знижуючи потужність нагріву при наближенні до уставки та повністю усуваючи проблему перерегулювання.

2). Нейромережеве прогнозування та "м'які сенсори".

Головна технологічна проблема стерилізації – неможливість прямого вимірювання температури всередині кожної банки в промислових умовах. Впровадження фізичних термопар руйнує герметичність тари і застосовується лише в лабораторних цілях.

Для вирішення цієї проблеми використовують штучні нейронні мережі, які виконують роль "м'якого сенсора" (віртуального датчика).

Математично робота базового нейрона описується функцією активації  $f$ , яка застосовується до зваженої суми вхідних сигналів:

$$y = f \left( \sum_{i=0}^n w_i x_i + b \right), \quad (4)$$

де  $x_i$  – вхідні параметри,  $w_i$  – синаптичні ваги,  $b$  – зміщення.

У контексті керування автоклавом розробляються багатoshарові персептрони або рекурентні нейронні мережі, де:

- вхідні дані: поточна температура та тиск середовища в автоклаві, час від початку процесу, початкова температура продукту, тип тари;
- прихований шар: витягує складні нелінійні залежності процесу теплообміну.
- вихідні дані: прогнозована температура в "холодній точці" банки  $T_{core}$  або безпосередньо визначений показник накопиченої летальності  $F_0$ .

Навчання такої мережі відбувається на великих історичних датасетах, зібраних під час лабораторних прогонів з реальними датчиками. Після навчання (мінімізації фу-

нкції втрат) нейромережа здатна з високою точністю, а саме з похибкою менше 0.5°C прогнозувати температуру продукту виключно на основі показників середовища автоклава.

Незважаючи на високу гнучкість, системи на базі ANN критично залежать від репрезентативності навчальних даних. Якщо на завод надійде партія кабачків з іншою щільністю або вологістю, ніж ті, на яких навчалася модель, точність віртуального датчика може суттєво знизитись. Саме тому найперспективнішим напрямком є створення гібридних нейро-нечітких мереж (ANFIS).

**Висновки.** Проведений аналіз існуючих технологічних рішень (табл.1) дозволяє стверджувати, що на сьогодні відсутній єдиний універсальний підхід до керування режимами стерилізації у вертикальних автоклавах.

Хоча класичні контури регулювання на базі ПІД-законів продовжують масово експлуатуватися на підприємствах харчової промисловості завдяки своїй простоті, вони фактично вичерпали свій оптимізаційний потенціал. Такі системи гарантують базову мікробіологічну безпеку, проте не здатні забезпечити гнучке енергозбереження та максимальне збереження харчової цінності (зокрема термолабільних вітамінів) у плодово-овочевій продукції.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика методів керування автоклавами

Технологія керування	Метод регулювання	Ступінь інерційності	Основні виклики
Класичні (PID)	Регулювання за відхиленням	Високий	Перерегулювання, складність налаштування під різні консерви
Предиктивні (MPC)	Оптимізація за моделлю	Низький	Високі вимоги до обчислювальних потужностей, залежність від точності моделі
Інтелектуальні (Fuzzy/ANN)	Адаптивне/Навчальне	Середній	Складність отримання якісних даних для навчання

Окремою науково-практичною проблемою залишається термічна обробка складноструктурної консервації. Більшість існуючих прогностичних моделей показують високу точність лише для гомогенних середовищ (наприклад, фруктових соків або пюре). Водночас значна частина плодово-овочевих консервів (овочеві рагу, лечо, багатокомпонентні салати) є складними гетерогенними системами зі змінними теплофізичними властивостями. Використання стандартних алгоритмів для таких продуктів призводить до значних похибок у розрахунках накопиченої летальності та, як наслідок, до термічного пошкодження сировини (переварювання).

Виходячи з виявлених недоліків, найбільш перспективним вектором розвитку автоматизації в цій галузі є відмова від ізольованих методів на користь синергії класичної теорії керування та технологій штучного інтелекту. Впровадження гібридних комплек-

сів – зокрема, адаптивних нечітких регуляторів (Fuzzy-PID) або систем предиктивного керування з елементами нейромережевої корекції – дозволить компенсувати нелінійність процесів теплообміну та індивідуальні властивості різної плодоовочевої сировини.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Alpert A. J., Alfaro E. Managing Indoor Mushroom Cultivation: A Protocol-Based Approach to Controlled Environment Agriculture. ScholarWorks. Cal Poly Pomona, 2024. URL: <https://scholarworks.calstate.edu/concern/projects/2j62sf452>.
2. Luh B. S. Principles and Applications of Vegetable Processing. Processing Vegetables / ed. by D. S. Smith, J. N. Cash, W. K. Nip, Y. H. Hui. Boca Raton: Routledge, 1997. P. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203741863-2>.
3. Khalilov F. V. Automation of the Sterilization Process of Canned Products in the Master SCADA System. Galaxy International Interdisciplinary Research Journal. 2021. Vol. 9, No. 12. P. 659–662. URL: <https://www.neliti.com/publications/597160/automation-of-the-sterilization-process-of-canned-products-in-the-master-scada-s>.
4. Трегуб В.Г. Побудова математичної моделі автоматизованого апарата періодичної дії / В.Г. Трегуб // Харчова промисловість. - 2004. - № 3. - С. 165 - 169.
5. Jimenez P. S., Bangar S. P., Suffern M., Whiteside W. S. Understanding retort processing: A review. Food Science & Nutrition. 2024. Vol. 12. P. 1545–1563. URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fsn3.3912>.
6. Tirado-Kulieva V. A. Computational Applications for the Evaluation and Simulation of the Thermal Treatment of Canned Foods. IntechOpen, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.78107>.
7. Artificial intelligence techniques for microwave drying of agricultural products: A review. IoT and AI in Agriculture. Springer, 2024. P. 311–341. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-95-5218-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-981-95-5218-4_21).

#### REFERENCES

1. Alpert A. J., Alfaro E. Managing Indoor Mushroom Cultivation: A Protocol-Based Approach to Controlled Environment Agriculture. ScholarWorks. Cal Poly Pomona, 2024. URL: <https://scholarworks.calstate.edu/concern/projects/2j62sf452>.
2. Luh B. S. Principles and Applications of Vegetable Processing. Processing Vegetables / ed. by D. S. Smith, J. N. Cash, W. K. Nip, Y. H. Hui. Boca Raton: Routledge, 1997. P. 1–46. DOI: <https://doi.org/10.1201/9780203741863-2>.
3. Khalilov F. V. Automation of the Sterilization Process of Canned Products in the Master SCADA System. Galaxy International Interdisciplinary Research Journal. 2021. Vol. 9, No. 12. P. 659–662. URL: <https://www.neliti.com/publications/597160/automation-of-the-sterilization-process-of-canned-products-in-the-master-scada-s>.
4. Trehub V.H. Pobudova matematychnoi modeli avtomatyzyvanoho aparata periodychnoi dii / V.H. Trehub // Kharchova promyslovisht. — 2004. — № 3. — S. 165—169. [in Ukrainian].
5. Jimenez P. S., Bangar S. P., Suffern M., Whiteside W. S. Understanding retort processing: A review. Food Science & Nutrition. 2024. Vol. 12. P. 1545–1563.

URL: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/fsn3.3912>.

6. Tirado-Kulieva V. A. Computational Applications for the Evaluation and Simulation of the Thermal Treatment of Canned Foods. IntechOpen, 2022.

DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.78107>.

7. Artificial intelligence techniques for microwave drying of agricultural products: A review.

IoT and AI in Agriculture. Springer, 2024. P. 311–341.

DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-95-5218-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-981-95-5218-4_21).

Received 21.04.2026.

Accepted 24.04.2026.

Published 30.04.2026

### ***Analysis of control methods for thermal processing of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves***

*Abstract: The paper examines the features of the process of heat treatment of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves aimed at preserving their quality and safety for a long time. An analysis of existing methods of controlling the processes of heat treatment of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves is carried out. The problems of using traditional proportional-integral-differential (PID) controllers are considered, due to the significant thermal inertia of the object and the complexity of setting it up for different types and masses of loading. Promising approaches to automation are analyzed, in particular model-based predictive control (MPC), which allows optimizing the process directly according to the target indicator of accumulated microbiological lethality ( $F_0$ ) taking into account technological limitations. Special attention is paid to the possibilities of using intelligent methods, such as adaptive fuzzy controllers (Fuzzy-PID) and artificial neural networks (ANN), which perform the function of virtual "soft sensors" for predicting the temperature inside the container. It was found that the use of standard algorithms for such products leads to significant errors in the calculations of accumulated lethality and, as a result, to thermal damage to raw materials (digestion). The results of the analysis substantiate the need to transition to hybrid intelligent control systems to ensure energy efficiency, compensate for the nonlinearity of heat exchange processes and preserve the nutritional value of complex heterogeneous products.*

*Keywords: vertical autoclave, heat treatment, PID controller, predictive control, fuzzy logic, artificial neural networks, accumulated lethality, control optimization.*

**Дукач Андрій Юрійович** – аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-7319-6196>

**Рудакова Ганна Володимирівна** – д.т.н., професор, професор кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8053-4218>

**Поліщук Валентин Мойсейович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки Херсонського національного технічного університету,

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8775-4977>

**Dukach Andriy** – Postgraduate student of Automation, Robotics and Mechatronics Department, Kherson National Technical University.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0000-7319-6196>

**Rudakova Hanna** – Doctor of Engineering sciences, Professor, Professor of Automation, Robotics and Mechatronics Department, Kherson National Technical University.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8053-4218>

**Polishchuk Valentyn** – Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Automation, Robotics and Mechatronics Department, Kherson National Technical University.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-8775-4977>

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ТА РОЗРОБЛЕННЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИБРОЄМ НА БАЗІ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ

*Анотація.* Стаття присвячена розробці та реалізації інтелектуальної системи керування FPV-пристроєм, яка здатна виконувати автономне донаведення на ціль при втраті зв'язку з оператором. Актуальність дослідження обумовлена широким застосуванням FPV-пристроїв та необхідністю подолання їх ключового недоліку - залежності від стабільного радіозв'язку.

Система реалізована на платформі Orange Pi 5 Max та використовує модель YOLOv11 для детекції об'єктів, навчену на наборі даних VisDrone з подальшою оптимізацією для NPU. Для трекінгу множинних об'єктів застосовано алгоритм SORT з фільтром Калмана. Розроблено модульну багатопотокову архітектуру з інтеграцією протоколу MAVLink для комунікації з польотним контролером ArduPilot та PID-регуляторів для режиму автономного переслідування.

Експериментальні випробування на статичному стенді підтвердили працездатність системи, проте виявили певні обмеження продуктивності: модель YOLOv11n забезпечує латентність 70-80 мс (камера 50 мс + інференс 25-30 мс), що відповідає вимогам реального часу, тоді як YOLOv11s демонструє кращу точність детекції, але сумарну латентність понад 120 мс. INT8 квантизація забезпечила прискорення у 1.5 рази з мінімальним зниженням точності. Для практичного застосування рекомендовано використання швидкодіючої камери з меншою затримкою, портування критичних компонентів на C/C++ та оптимізацію системного середовища.

*Ключові слова:* FPV-пристрій, комп'ютерний зір, трекінг, детекція, YOLO, SORT, ORANGEPI, RK3588

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток технологій безпілотних літальних апаратів відкриває нові можливості для автоматизації широкого спектру завдань у цивільній та спеціальній сферах. Масова поява FPV-пристроїв (англ. First Person View) здійснила прорив у галузі інформаційних технологій, що дозволило керувати пристроєм з ефектом присутності при забезпеченні високої маневреності, точності і можливості польотів у складному середовищі та забезпечити миттєву трансляцію з мінімальною затримкою. Серед недоліків FPV-пристроїв виділяють відсутність автоматичних режимів стабілізації (GPS) у більшості спортивних моделей та необхідність підтримувати стійкий зв'язок з оператором по відео каналу та каналу керування. При використанні FPV-пристроїв існує ризик втрати зв'язку, коли висота польоту знижується і зникає умова прямої видимості станції керування. Проблему втрати зв'язку можна

вирішити за допомогою системи донаведення, яка побудована на базі комп'ютерного зору і штучного інтелекту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Серед існуючих рішень можна виділити комерційні, які більше акцентовані на задачах спортивних перегонів, екстремальної аерозйомки і кінематографії та в більшості випадків використовують супутникову навігацію. В реаліях сьогодення при активному розвитку цього напрямку існує декілька спеціальних платформ з запропонованими рішеннями та програмним забезпеченням від виробника (наприклад, платформи VGI-9 [1] та Zir System [2]). Окрім того існує багато різних аматорських та напівпрофесійних команд, які займаються вивченням алгоритмів керування пристроями в умовах протидії ризикам втрат зв'язку. Отже, надалі не пропонується абсолютно новий підхід або нове рішення, а в більшій мірі досліджується варіант створення подібної системи на базі недорогого одноплатного комп'ютера.

Для забезпечення стабілізації та виконання базових команд керування сучасні FPV-пристрої використовують спеціалізовані контролери. Найпоширенішими платформами є Betaflight, ArduPilot та PX4, з яких Ardupilot – платформа з відкритим вихідним кодом, з підтримкою зручного протоколу комунікації з MAVLink, який може бути використаний для зв'язку з компаньйон-комп'ютером (англ. companion computer) [3].

Серед популярних компаньйон-комп'ютерів можна відокремити Nvidia Jetson Nano [4], який має потужний GPU для задач комп'ютерного зору, але і має високу ціну. Новітній, надпотужний одноплатний мінікомп'ютер Raspberry Pi 5 з використанням додаткового розширення NPU [5] має значно оновлену архітектуру, що дозволяє використовувати його для розробки, штучного інтелекту та серверів. Для проведення експериментів авторами було обрано Orange Pi 5 на базі чіпсету Rockchip RK3588, який вже має вбудований прискорювач NPU продуктивністю 6 TOPS [6], за його привабливі характеристики та низьку ціну.

Детекція об'єктів є фундаментальною задачею комп'ютерного зору, що полягає у визначенні положення та класифікації об'єктів на зображенні. Для систем керування FPV-пристроями критичними є швидкість обробки та точність детекції. Традиційні методи детекції мають низьку точність на складних сценах та повільну роботу. Двоступеневі детектори мають високу точність, але низьку швидкість. Для підтримки балансу точності та швидкості науковцями запропоновано одноступеневі детектори, SSD та модель YOLO [7]. У запропонованому авторами рішенні в якості детектора використана модель YOLOv11 з покращеною архітектурою для ефективної обробки малих об'єктів. В розробленій системі підтримується експорт у відкриту бібліотеку програмного забезпечення Open Neural Network Exchange (ONNX) для побудови нейронних мереж глибокого навчання та подальшої оптимізації і розгортання на цільових платформах.

Після детекції об'єктів на окремих кадрах постає задача їх трекінгу – встановлення відповідності між детекціями на послідовних кадрах. Традиційні алгоритми SORT та його розширення DeepSORT використовують переважно фільтр Калмана для передбачення і згладжування та Hungarian Algorithm для асоціації, мають високу продук-

тивність, але погано працюють з оклюзіями (ситуаціями з розташуванням об'єктів та досягненням до певної частини тривимірної сцени через існуючі перепони). Більш сучасні підходи задачі трекінгу реалізовані в алгоритмах ByteTrack, BotSort, StrongSORT, FairMOT, які дозволяють ефективніше працювати з сотнями швидко рухомих об'єктів зі стійкістю до оклюзій. Для реалізації трекінгу в системі авторами обрано швидкий алгоритм SORT, який забезпечує утримання одиночної цілі FPV-пристроєм у випадку, коли детекція може зникати та/або змінюватися. Використаний алгоритм має простоту імплементації та налагодження, високу швидкість роботи та достатню точність для більшості сценаріїв [8].

**Мета дослідження.** Метою даного дослідження є аналіз методів машинного зору та детекції об'єктів, розроблення та реалізація інтелектуальної системи керування FPV-пристроєм на базі штучного інтелекту, яка здатна виконувати автоматичну детекцію, трекінг та відстеження обраних об'єктів у режимі реального часу. Заплановано розгортання системи на граничному рівні (англ. Edge) пристрою з подальшим безпосереднім встановленням відповідного програмного забезпечення.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Основними вимогами до системи керування є продуктивність, точність та ресурсоефективність. Система має забезпечувати обробку відеопотоку з частотою не менше 30 відображених кадрів за одну секунду (англ. Frames Per Second, FPS) на цільовій апаратній платформі Orange Pi 5. Загальна латентність від отримання кадру до генерації керуючої команди не повинна перевищувати 100 мс для забезпечення своєчасної реакції на зміни у сцені. Вимогами для системи є висока гнучкість та сумісність для запуску в середовищі OS Ubuntu Linux 22.04. Для реалізації прототипу використано мову Python через швидкість прототипування, підтримку всіх необхідних компонентів та кросплатформеність.

**Архітектура системи.** Розроблена система керування пристроєм базується на принципах модульної архітектури з чітким розділенням відповідальності між компонентами (рис. 1).

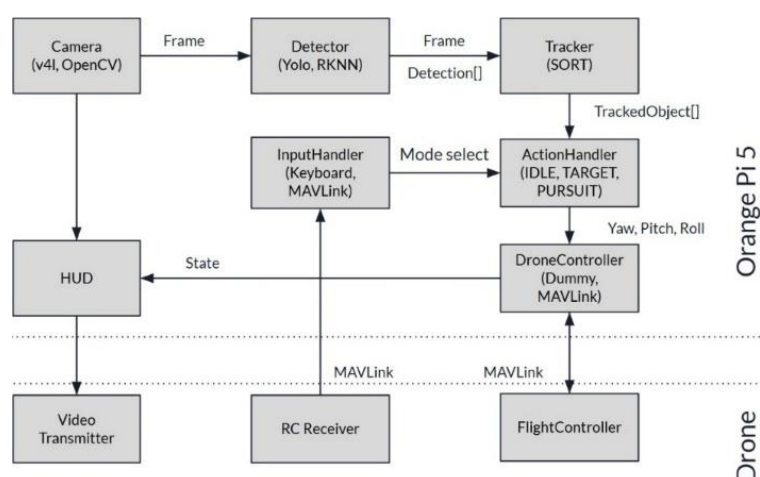


Рисунок 1 – Схема архітектури

Підсистема сприйняття складається з захоплення відеопотоку з камери, детекції об'єктів в кадрі та трекеру виявлених об'єктів.

Підсистема вводу відповідає за комунікацію з дроном, визначення команди на захоплення об'єкту чи на зміну режиму роботи.

Підсистема керування займається обробкою керуючої команди, установкою відповідного алгоритму роботи з виділенням об'єктом, та обчислення впливу на пристрій.

Підсистема виводу Heads Up Display (HUD) виводить інформаційну панель, поточний режим та підсвічує об'єкти, що відстежуються, формує зображення для передачі на відео передавач пристрою.

Система працює за принципом конвеєрної обробки з використанням багатопотоковості (рис. 2) для мінімізації латентності.

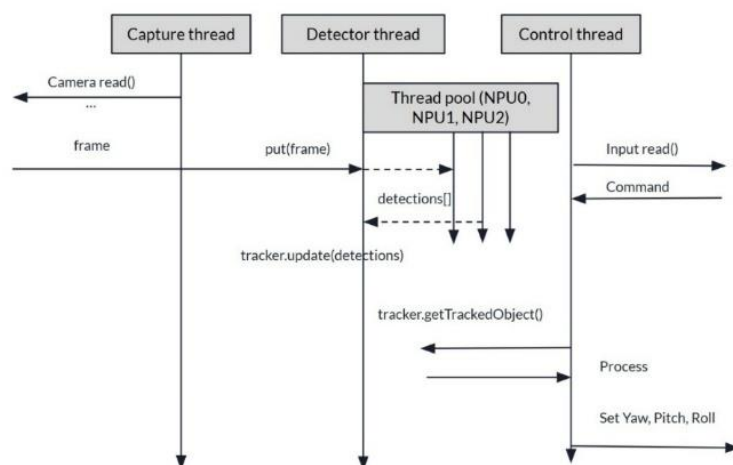


Рисунок 2 – Модель багатопотоковості

Перший потік відповідає за захват зображень з камери, другий – за детекції і відстежування. Чіпсет RK3588 має 3 ядра NPU, які можуть бути використані одночасно, тому детектор RKNN додатково містить пул потоків з завданнями, які назначаються на окреме ядро. Окремий потік виділено для обробки вводу та обчислення стану системи в залежності від поточного режиму та об'єкту, що відстежується.

**Практична апробація системи.** Сімейство моделей YOLOv11 представлено п'ятьма варіантами різного розміру від nano до extralarge.

Найлегша модель YOLOv11n містить лише 2.6 мільйона параметрів та забезпечує швидкість понад 100 FPS на сучасних GPU, що робить її оптимальною для мобільних пристроїв та real-time застосувань, проте за рахунок зниженої точності модель YOLOv11s (9.4M параметрів) представляє оптимальний баланс між продуктивністю та точністю для Edge-пристроїв середнього класу. Саме ці дві моделі було обрано для експериментів в рамках даного дослідження.

Для навчання моделі детекції об'єктів використано комбінований підхід: тренування моделі проходить на великому відкритому датасеті VisDrone [9], пізніше модель може бути донавчена на користувацьких даних, які є специфічними для конкретної задачі. На рисунку 3 наведено графіки процесу навчання моделі на датасеті VisDrone на 300 епохах.

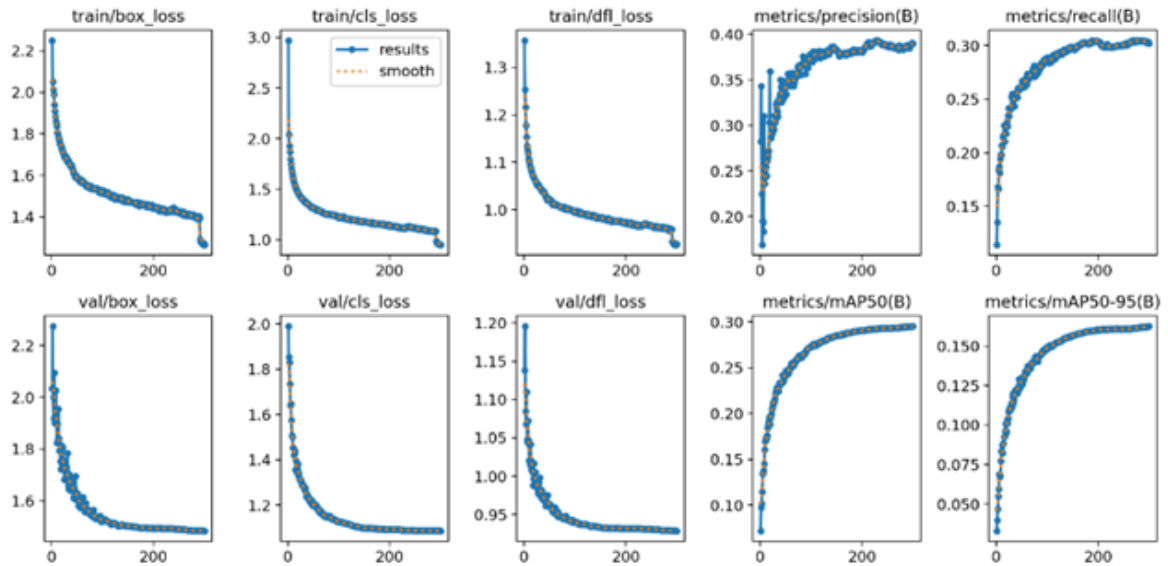


Рисунок 3 – Графік навчання моделі yolo11n на 300 епохах

Для оцінки точності моделей класифікації виконано порівняння графіків коефіцієнта довіри F1 від критичної метрики продуктивності F1-Confidence до/після навчання (рис. 4) показано. Значення точності mAP виявлення об’єктів для всіх класів лишається достатньо низьким, значення впевненості для окремого класу car є суттєвим для використання його в експериментах.

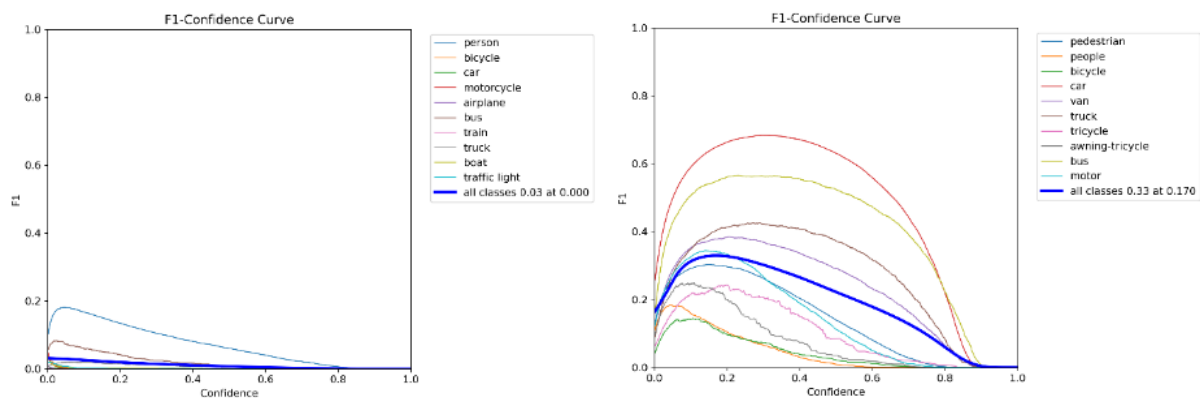


Рисунок 4 – Графіки до та після навчання моделі YOLO11n

Для забезпечення процесу (англ. Fine-tuning) додаткового тренування (донавчання) вже попередньо навченої моделі (англ. pre-trained model) на меншому, вузькоспеціалізованому наборі даних з відео перехоплення, - створений датасет interceptor. Сформований датасет використано для тестів навчання та процедури створення та анотації власних наборів даних. Донавчання на датасеті interceptor проведено за технологією transfer learning, яка полягає в заморозці перших 10 шарів моделі YOLO для збереження низькорівневих ознак та зменшенні learning rate для запобігання катастрофічного забування.

Після навчання модель оптимізовано для роботи на NPU. Процес включає конвертацію у формат ONNX з визначеними перетвореннями: видаленню дублікатів і перек-

риваючих рамок під час детекції об'єктів (англ. Non-Max Suppression) та вирішення проблеми дисбалансу (англ. Distribution focal loss) шарів, через некоректну роботу з квантизацією та уповільненням виконання на Rockchip NPU, з подальшим переносом цих операцій на CPU. Наступним кроком перетворення моделі є конвертація у формат RKNN з INT8 квантизацією, що дає незначне зниження точності, але значно прискорює інференс та зменшує споживання пам'яті.

Тестовий стенд складається з пристрою Orange Pi 5 Max та 13МП камерою. Пристрій підтримує підключення монітору через інтерфейс HDMI для контролю виконання програмного додатку у десктопному середовищі. В реальних умовах система вимагає налаштувань в Headless режимі з виводом відео-напрямку у фреймбуфер (ділянка пам'яті для тимчасового зберігання зображення перед його виведенням на екран). Далі цифровий відеосигнал потрапляє на цифро-аналоговий конвертор звідки у форматі аналогового кольорового телебачення (англ. PAL) подається на відеопередавач пристрою.

Проведено експериментальні випробування розробленої системи керування пристроєм з метою верифікації працездатності ключових компонентів та оцінки їх продуктивності. Випробування виконувалися на статичному стенді без фізичної інтеграції з пристроєм.

Під час роботи зібрані метрики (табл. 1).

Таблиця 1

Основні метрики роботи системи

Модель	Затримка детектора, мс
yolo11n квантизована	25-30
yolo11n не квантизована	48-50
yolo11s квантизована	65-70

Отримане значення затримки трекеру менше 2 мс на кількості об'єктів до 10. На додачу до затримки камери в 45-50 мс отримано ~70 мс повної затримки на моделі YOLO11n, що вкладається в задані 100 мс. Модель YOLO11s продемонструвала кращу роботу детекції, виявивши об'єкти, які знаходились за перепонами, але затримка роботи детектора склала до 70 мс, що сумарно виходить за рамки заданого значення.

Використання квантизованої моделі yolo11n дало приріст продуктивності в 1.5 рази, з некритичним зниженням точності (об'єкти мали рамки різних розмірів). Під час роботи системи завантаження NPU ядер чіпсету RK3588 не перевищувало 18-25%, що пов'язано з фактом використання повільної камери. Температурний режим пристрою під час роботи знаходився в адекватних границях через використання радіатора та кулера активного охолодження, температура процесорного ядра не піднімалась вище 30 градусів. Камера нагрівалась до температури 40 градусів, тому рекомендовано використання окремого додаткового охолодження камери.

**Висновки.** У ході виконання дослідження розроблено та реалізовано інтелектуальну систему керування FPV-пристроєм на базі штучного інтелекту, здатну виконувати автоматичну детекцію та трекінг об'єктів у реальному часі на граничному пристрої

Orange Pi 5 з NPU RK3588. Система базується на архітектурі YOLOv11n та YOLOv11s, навчених на наборі даних VisDrone з подальшою INT8 квантизацією для NPU, та алгоритмі SORT з фільтром Калмана для трекінгу об'єктів. Спроектовано модульну багато-поточкову архітектуру з інтеграцією протоколу для комунікації MAVLink з польотним контролером ArduPilot та реалізовано PID-регулятори для режиму автономного переслідування цілі. Експериментальне тестування підтвердило працездатність системи на статичному стенді, проте виявило обмеження продуктивності: затримка захоплення кадру з камери становила 50 мс, інференс моделі YOLOv11s – 70 мс, що перевищує вимоги систем керування реального часу (<100 мс сумарно). Для досягнення прийнятної латентності рекомендовано використання камери з нижчою роздільністю та зменшеною затримкою, портування критичних компонентів на C/C++ та оптимізацію середовища виконання через вимкнення непотрібних системних сервісів.

Подальший розвиток передбачає тестування в симуляційному середовищі SITL, інтеграцію з реальним пристроєм та випробування для валідації повної функціональності системи автономного донаведення.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. VGI-9 team. Autonomous Guidance for Combat Drones. URL: <https://vgi.com.ua/en/> (дата звернення 07.12.2025)
2. ЗІР система розпізнавання та ураження цілей. URL: <https://zir-system.com/> (дата звернення 07.12.2025)
3. ArduPilot Dev Team. (2024). ArduPilot Documentation. URL: <https://ardupilot.org/> (дата звернення 07.12.2025)
4. NVIDIA. (2024). Jetson Platform. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/jetson-store/> (дата звернення 07.12.2025)
5. Raspberry Pi Foundation. (2024). Raspberry Pi 4 Model B Specifications. URL: <https://www.raspberrypi.org/> (дата звернення 07.12.2025)
6. Orange Pi. (2024). Orange Pi 5 Specifications. URL: <http://www.orangepi.org/> (дата звернення 07.12.2025)
7. Ultralytics. (2024). YOLOv11: Next Generation Object Detection. URL: <https://docs.ultralytics.com/models/yolo11/> (дата звернення 07.12.2025)
8. Bewley, A., et al. (2016). Simple online and realtime tracking. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 3464-3468.
9. Du, D., et al. (2019). VisDrone-DET2019: The vision meets drone object detection in image challenge results. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops.

## REFERENCES

1. VGI-9 team. Autonomous Guidance for Combat Drones. URL: <https://vgi.com.ua/en/> (дата звернення 07.12.2025)
2. ZIR target recognition and engagement system. URL: <https://zir-system.com/> (дата звернення 07.12.2025)
3. ArduPilot Dev Team. (2024). ArduPilot Documentation. URL: <https://ardupilot.org/> (дата звернення 07.12.2025)
4. NVIDIA. (2024). Jetson Platform. URL: <https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/jetson-store/> (дата звернення 07.12.2025)
5. Raspberry Pi Foundation. (2024). Raspberry Pi 4 Model B Specifications. URL: <https://www.raspberrypi.org/> (дата звернення 07.12.2025)
6. Orange Pi. (2024). Orange Pi 5 Specifications. URL: <http://www.orangepi.org/> (дата звернення 07.12.2025)
7. Ultralytics. (2024). YOLOv11: Next Generation Object Detection. URL: <https://docs.ultralytics.com/models/yolo11/> (дата звернення 07.12.2025)
8. Bewley, A., et al. (2016). Simple online and realtime tracking. IEEE International Conference on Image Processing (ICIP), 3464-3468.
9. Du, D., et al. (2019). VisDrone-DET2019: The vision meets drone object detection in image challenge results. Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision Workshops.

Received 21.04.2026.  
Accepted 24.04.2026.  
Published 30.04.2026

### ***Research into technologies and development of artificial intelligence-based device control system***

*Analysis of recent studies and publications. Among the existing solutions, commercial ones can be distinguished, which are more focused on the tasks of sports racing, extreme aerial photography and cinematography and in most cases use satellite navigation. In today's realities, with the active development of this direction, there are several special platforms with proposed solutions and software from the manufacturer (for example, the VGI-9 [1] and Zir System [2] platforms).*

*Purpose of research. The purpose of this research is to analyze machine vision and object detection methods, develop and implement an intelligent FPV device control system based on artificial intelligence, which is capable of performing automatic detection, tracking and tracing of selected objects in real time. It is planned to deploy the system at the edge level of the device with subsequent direct installation of the appropriate software.*

*Presentation of the main research material. The main requirements for the control system are performance, accuracy and resource efficiency. The system must provide video stream processing with a frequency of at least 30 displayed frames per second (Frames Per Second, FPS) on the target hardware platform Orange Pi 5.*

*System architecture. The developed device control system is based on the principles of modular architecture with a clear separation of responsibilities between components. The*

*system operates on the principle of pipeline processing using multi-threading to minimize latency.*

*Practical testing of the system. The YOLOv11 model family is represented by five variants of different sizes from nano to extralarge.*

*A combined approach was used to train the object detection model: the model is trained on the large open VisDrone dataset [9], later the model can be further trained on user data that is specific to a particular task.*

*The test bench consists of an Orange Pi 5 Max device and a 13MP camera. In real conditions, the system requires settings in Headless mode with video output to the framebuffer (a memory area for temporary storage of the image before displaying it on the screen).*

*Experimental tests of the developed device control system were conducted to verify the operability of key components and assess their performance. The tests were performed on a static stand without physical integration with the device.*

*Conclusions. In the course of the research, an intelligent FPV device control system based on artificial intelligence was developed and implemented, capable of performing automatic detection and tracking of objects in real time on the Orange Pi 5 edge device with NPU RK3588. A modular multi-threaded architecture was designed with the integration of the MAVLink communication protocol with the ArduPilot flight controller and PID controllers for the autonomous target pursuit mode were implemented. Experimental testing confirmed the system's operability on a static stand, but revealed performance limitations.*

*Keywords: FPV, computer vision, object tracking, object detection, YOLO, SORT, ORANGEPI, RK3588.*

**Сподинець Олег Павлович** - магістр, 121 Інженерія програмного забезпечення Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9259-8560>

**Божуха Лілія Миколаївна** - кандидат фізико-математичних наук, доцент, Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1420-1220>

**Spodynets Oleh** - master, 121 software engineering Oles Honchar Dnipro national university.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1520-1211>

**Bozhukha Liliya Nikolaevna** - Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Oles Honchar Dnipro National University

ORCID: <https://orcid.org/0009-0004-9259-8560>

О.В. Поливода, І.О. Назмєєв

## МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ РУХОМИХ ОБ'ЄКТІВ НА ОСНОВІ КЛАСТЕРИЗАЦІЇ ОЗНАК У МЕЛ-КЕПСТРАЛЬНОМУ ПРОСТОРИ

*Анотація. Впровадження інтелектуальних систем моніторингу в промислово автоматизацію та новітні транспортні системи потребує розробки методів ідентифікації рухомих об'єктів, здатних стабільно функціонувати в умовах високого рівня завад та обмеженої видимості. Традиційні амплітудні методи обробки є чутливими до нестаціонарності акустичних сигналів та зміни відстані до джерела, що ускладнює точну сегментацію динамічних станів об'єкта. Метою роботи є розробка методу ідентифікації фаз руху на основі мел-кепстрального аналізу, інтелектуальної кластеризації методом К-середніх, віконному перетворенні Фур'є, психоакустичній фільтрації та декореляції ознак у кепстральному просторі. В ході дослідження отримано матрицю ознак, яка дозволяє виділити цифровий відбиток об'єкта, інваріантний до коливань гучності. Експериментально підтверджено ефективність сегментації фаз наближення, проїзду та віддалення з високою швидкістю обчислень, що дозволяє інтегрувати метод у системи автоматизованого керування та технічної діагностики в режимі реального часу.*

*Ключові слова: ідентифікація рухомих об'єктів, мел-кепстральні коефіцієнти, кластеризація, автоматизація моніторингу, акустичний сигнал, цифрова обробка сигналів, промислова автоматизація, сегментація фаз руху.*

**Постановка проблеми.** Сучасний стан розвитку інтелектуальних транспортних систем та систем автоматизованого моніторингу висуває високі вимоги до точності та швидкодії алгоритмів розпізнавання рухомих об'єктів. Традиційні методи ідентифікації, що базуються на візуальному аналізі даних, а саме застосуванні відеокамер, часто виявляються малоефективними в умовах обмеженої видимості, несприятливих погодних умов або складного освітлення. У зв'язку з цим, дедалі більшої ваги набувають акустичні методи моніторингу, які є пасивними, економічно доцільними та здатними функціонувати в безперервному режимі.

Аналіз акустичних сигналів рухомих об'єктів супроводжується низкою проблем, зумовлених їх нестаціонарністю, високим рівнем фонових завад та амплітудними спотвореннями внаслідок ефекту Доплера та зміни відстані до мікрофона. Існуючі підходи часто фокусуються лише на класифікації типу об'єкта, ігноруючи необхідність точної сегментації фаз його руху (наближення, проїзд, віддалення), що ускладнює автоматизацію процесів прийняття рішень у реальному часі, тому виникає необхідність у розробці

стійкого методу ідентифікації, який би поєднував ефективні способи виділення інформативних ознак, що інваріантні до енергетичних коливань сигналу, з алгоритмами інтелектуальної кластеризації. Використання кепстрального аналізу в комбінації з ітераційним перерахунком центроїдів станів об'єкта дозволить автоматизувати процес розпізнавання динаміки руху, забезпечуючи високу вірогідність ідентифікації в складних акустичних середовищах.

Особливої актуальності дана задача набуває в умовах промислових підприємств та автоматизованих складських комплексів, де рухомі об'єкти, такі як внутрішньозаводський транспорт, робототехнічні пристрої, конвеєрні лінії, функціонують у середовищі з високим рівнем техногенних завад, а стандартні амплітудні методи ідентифікації стають недієздатними через постійні відлуння та накладання шумів від працюючих агрегатів. Тому існує потреба у впровадженні методів інтелектуальної ідентифікації, здатних виділяти корисний сигнал на основі його спектральної структури, а не лише інтенсивності, що є необхідною умовою для забезпечення безпеки та безперервності автоматизованих виробничих процесів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема автоматизованої ідентифікації рухомих об'єктів за їх акустичними сигналами займає важливе місце у сучасних дослідженнях, що присвячені розвитку інтелектуальних транспортних систем та систем технічної діагностики. Питання аналізу нестационарних шумів пов'язані з переходом від класичних спектральних методів до часово-частотних перетворень [1]. Доведено, що використання стандартного швидкого перетворення Фур'є не завжди забезпечує достатню інваріантність до шумів навколишнього середовища [2] і стає актуальним використання мел-кепстрального аналізу [3], який був розроблений для розпізнавання мовлення, але є надзвичайно ефективним у технічній акустиці [4]. Наприклад, при розпізнаванні типів двигунів мел-кепстральний аналіз [5] дозволяє ефективно декорелювати спектральні компоненти та виділяти огинаючу спектра, яка є унікальною для різних режимів роботи об'єкта.

У сфері інтелектуального аналізу даних використовуються алгоритми навчання без учителя для сегментації фаз руху, при цьому одним з найбільш продуктивних підходів використовується метод К-середніх через його низьку обчислювальну складність. Кластеризація у кепстральному просторі забезпечує вищу точність розділення стану руху об'єкта порівняно з аналізом у часовій області, оскільки кепстральні коефіцієнти менш чутливі до амплітудних флуктуацій, викликаних зміною відстані [6].

Проте залишається недостатньо вивченим питання стабільності ідентифікації об'єктів в умовах високої інтенсивності фонових завад та специфічних імпульсних перешкод, що виникають у реальних промислових та міських локаціях. Більшість існуючих методів фокусуються на класифікації типів об'єктів, наприклад, легкове чи вантажне авто, залишаючи поза увагою задачу точної часової сегментації фаз руху в автоматичному режимі без попереднього навчання системи. Саме інтеграція кепстрального аналізу з ітераційною кластеризацією для вирішення задачі розпізнавання динамічних станів рухомих об'єктів потребує подальшого дослідження та вдосконалення.

**Метою дослідження** є розробка та дослідження методу автоматизованої ідентифікації фаз руху рухомих об'єктів на основі інтелектуального аналізу мел-кепстральних ознак та ітераційної кластеризації, що забезпечує стабільну сегментацію динамічних станів об'єкта в умовах нестационарних акустичних завад.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Процес отримання ознак для ідентифікації транспортних засобів базується на комбінації класичного спектрального аналізу та психоакустичного моделювання. Математична модель алгоритму складається з наступних кроків:

1. Попередня обробка та сегментація [2]. Оскільки акустичний сигнал автомобіля є нестационарним, він розділяється на короткі кадри (фрагменти) тривалістю  $N$  відліків. Для мінімізації ефекту розтікання спектра для вхідного дискретного сигналу виконується віконна обробка за методом Геммінга, результатом якої є зважена послідовність  $s_{\omega}(n)$ :

$$s_{\omega}(n) = s(n) \left[ 0.54 - 0.46 \cos \frac{2\pi \cdot n}{N-1} \right], \quad (1)$$

де  $s(n)$  – дискретні значення амплітуди звукового сигналу в межах одного аналізованого кадру,  $n$  – дискретний час.

2. Швидке перетворення Фур'є [1]. Для переходу з часової області у частотну для кожного вікна обчислюється дискретне перетворення Фур'є:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} s_{\omega}(n) \cdot e^{-i \frac{2\pi}{N} nk}, \quad (2)$$

де  $k$  – індекс частотної компоненти, ціле число, яке вказує на конкретну дискретну частоту після проведення швидкого перетворення Фур'є.

На основі отриманого спектра розраховується спектральна щільність потужності  $P(k)$ , яка відображає розподіл енергії сигналу за частотами:

$$P(k) = \frac{1}{N} |X(k)|^2. \quad (3)$$

3. Мел-фільтрація [6]. Перетворення лінійної частотної шкали  $f$  (Гц) у логарифмічну шкалу мелів  $m$ , яка імітує нелінійне сприйняття звуку людським вухом. Зв'язок між частотами визначається як:

$$m = 2595 \cdot \lg \left( 1 + \frac{f}{700} \right). \quad (4)$$

Енергія в кожній мел-смузі  $E(m)$  обчислюється шляхом згортки  $P(k)$  з набором трикутних фільтрів  $H_m(k)$ :

$$E(m) = \sum_{k=0}^{N/2} P(k) \cdot H_m(k), \quad m = 1, \dots, M, \quad (5)$$

де  $M$  – кількість фільтрів.

4. Логарифмування енергій. Для імітації логарифмічної чутливості слуху до інтенсивності звуку та для нормалізації динамічного діапазону обчислюється логарифм

енергії кожного фільтра  $S(m)$ , що надає алгоритму стійкості до значних змін амплітуди при зміні відстані від рухомого об'єкта до мікрофона,  $S(m) = \ln(E(m))$ .

5. Дискретне косинусне перетворення. Обчислення кепстральних коефіцієнтів шляхом застосування дискретного косинусного перетворення до логарифмічних енергій, що дає можливість декорелювати ознаки та виділити огинаючу спектра (спектральний контур):

$$C(n) = \sum_{m=1}^M S(m) \cdot \cos\left(\frac{\pi \cdot n}{M}(m - 0.5)\right), \quad n = 0, \dots, L - 1, \quad (6)$$

де  $L$  – кількість вихідних коефіцієнтів.

Коефіцієнт  $C(0)$  несе інформацію про середню енергію кадру, а  $C(1) \dots C(L-1)$  описують форму спектральних піків, що є унікальними для різних типів двигунів та режимів їх роботи.

Перевага використання мел-кепстрального аналізу у задачах ідентифікації транспортних засобів полягає в тому, що кепстральні коефіцієнти дозволяють розділити інформацію про джерело звуку (вібрації двигуна) та передавальну характеристику середовища. Це робить систему розпізнавання інваріантною до акустичних особливостей місцевості та погодних умов, фокусуючись на фундаментальних характеристиках об'єкта.

Після етапу формування матриці ознак, наступним кроком є автоматизований розподіл отриманих даних на групи, що відповідають фізичним станам руху транспортного засобу. Для цього найчастіше використовується метод  $K$ -середніх. Метою кластеризації є розбиття множини векторів ознак  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_M\}$  на  $K$  заздалегідь визначених кластерів  $S = \{S_1, S_2, \dots, S_K\}$ . У даному дослідженні  $K = 4$ , що відповідає фазам: фоновий шум, наближення, проїзд та віддалення.

Суть метода  $K$ -середніх полягає в мінімізації сумарного квадратичного відхилення точок кластерів від їх центрів (центроїдів), що математично виражається як

$$J = \sum_{i=0}^{K-1} \sum_{x \in S_i} \|x - \mu_i\|^2, \quad (7)$$

де  $x$  – вектор кепстральних коефіцієнтів,  $\mu_i$  – центроїд  $i$ -го кластера (еталонний спектральний портрет фази руху),  $\|x - \mu_i\|$  – евклідова відстань між вектором ознак та центром кластера.

Процес розрахунку виконується ітераційно і полягає в наступній послідовності дій. Випадковим чином або за певною стратегією обираються початкові координати  $K$  центроїдів  $\mu_i$ . Кожен вектор  $x_j$  відносять до того кластера, відстань до центроїда якого є мінімальною:

$$S_i^{(l)} = \left\{ x_j : \|x_j - \mu_i^{(l)}\|^2 \leq \|x_j - \mu_i^{(t)}\|^2 \right\} \text{ для всіх } l = 0, \dots, K - 1. \quad (8)$$

Обчислюються нові координати центроїдів як середнє арифметичне всіх векторів, що потрапили до відповідного кластера

$$\mu_i^{(t+1)} = \frac{1}{|S_i^{(t)}|} \sum_{x \in S_i^{(t)}} x. \quad (9)$$

Цикл повторюється до повної стабілізації центроїдів (збіжності алгоритму). Результатом кластеризації є набір з  $K$  центроїдів. Оскільки кожен центроїд  $\mu_i$  є вектором у кепстральному просторі, для візуалізації та фізичного аналізу проводиться зворотне перетворення або аналіз їхньої енергії у частотній області.

Доцільність застосування методу  $K$  – середніх для ідентифікації фаз руху об'єкта ґрунтується на сукупності технічних та аналітичних переваг, що відповідають специфіці акустичного моніторингу. Алгоритм характеризується високою швидкістю обчислень, що дозволяє ефективно обробляти великі масиви багатовимірних даних у режимі реального часу, забезпечуючи миттєву реакцію системи на зміну дорожньої обстановки. Метод забезпечує чітку фізичну інтерпретацію результатів, оскільки кожен сформований кластер безпосередньо корелює з рівнем акустичної енергії та спектральним складом звуку на різних відстанях від точки реєстрації. Застосування евклідової відстані в декорельованому кепстральному просторі гарантує високу стійкість класифікації, дозволяючи алгоритму стабільно розділяти фази руху об'єкта навіть за умов варіативності його швидкості або зміни інтенсивності фонового шуму.

Для перевірки ефективності розробленого методу було проведено аналіз натурального акустичного сигналу, що виникає під час руху об'єкта повз точку реєстрації. На рис. 1 представлена осцилограма отриманого сигналу, яка демонструє характерну амплітудну модуляцію. Форма сигналу зумовлена нестационарністю процесу та зміною відстані між джерелом звуку та мікрофоном, що є класичним прикладом для відпрацювання алгоритмів сегментації та ідентифікації станів руху

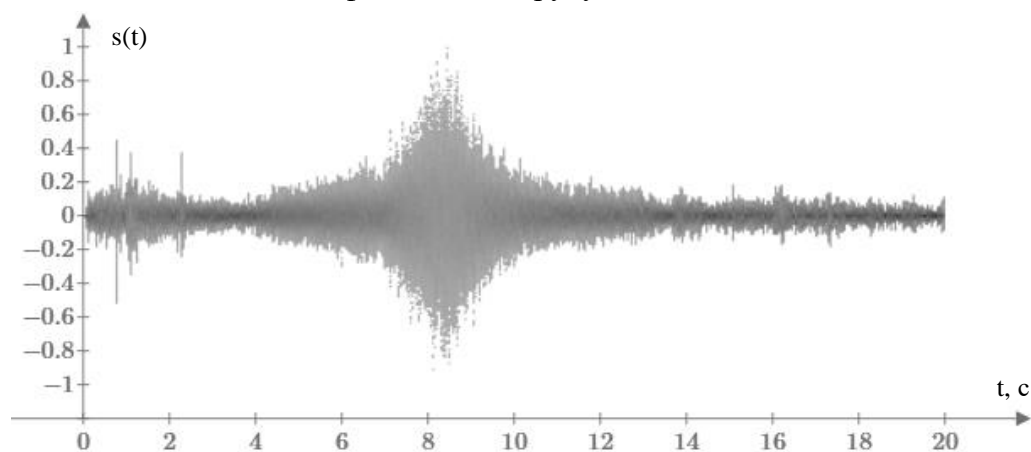


Рисунок 1 – Осцилограма акустичного сигналу транспортного засобу

Отриманий акустичний сигнал має характерну для рухомих об'єктів форму, що відображає динаміку зміни звукового тиску в часі протягом 20-секундного інтервалу запису. Осцилограма сигналу, нормована в діапазоні  $[-1; 1]$ , що дозволяє провести фазовий аналіз процесу ідентифікації. Початковий етап (0–6 сек) характеризується низькою та стабільною амплітудою (до 0.2), де переважає фоновий шум та віддалені низь-

кочастотні складові роботи двигуна. На інтервалі 6–8.5 сек спостерігається експоненціальне зростання енергії, що відповідає фазі активного наближення об'єкта. Точка максимального наближення фіксується приблизно на 8.5 сек, де пік амплітуди досягає значень 0.8...1, що корелює з нульовим рівнем децибел при спектральному аналізі. Подальше віддалення об'єкта (8.5–12 сек) супроводжується асиметричним спаданням амплітуди, зумовленим спрямованістю звукового випромінювання вихлопної системи та проявом ефекту Доплера, після чого сигнал поступово згасає до рівня фонового шуму (12–20 сек).

Для перетворення вхідного сигналу  $s(n)$  у матрицю ознак були послідовно виконані операції, що поєднують часовий та спектральний аналіз. На початковому етапі неперервний акустичний сигнал був розділений на кадри довжиною  $N = 1024$  відліків. Оскільки кожен фрагмент обробляється окремо, виникає ефект розриву сигналу на межах кадрів, для усунення якого застосовується вікно Геммінга (1), що надає можливість знизити амплітуду сигналу до мінімуму на краях вікна та отримати спектр без паразитної високочастотної складової. Для кожного згладженого кадру обчислено швидке перетворення Фур'є (2), яке переводить дані з часової області у частотну. Отримані комплексні амплітуди перетворені на спектр потужності  $P(k)$  згідно (3), що дозволяє ідентифікувати розподіл енергії рухомого об'єкта за гармоніками. Спектр проходить через набір з 26 трикутних фільтрів, що рівномірно розподілені за шкалою мелів (4) для інтегрування енергії у специфічних частотних смугах (5). Використання мел-шкали є важливим, оскільки вона дозволяє виділити низькочастотні компоненти, до яких система ідентифікації має бути найбільш чутливою. Отримані значення енергій логарифмуються, що наближає цифрову модель до логарифмічного характеру слуху людини та зменшує вплив значних коливань амплітуди, які виникають при зміні відстані до об'єкта, при цьому ознаки стають більш стабільними. До логарифмічних енергій застосовано дискретне косинусне перетворення (6), що дозволило трансформувати спектральні дані у кепстральні коефіцієнти, тобто стиснути основну інформацію про тембр звуку у перші 13 коефіцієнтів, відсікаючи при цьому дрібні спектральні шуми.

В результаті виконання процедур обробки акустичного сигналу отримана матриця  $S$ , де кожен стовпець представляє собою вектор з 13 елементів, що є унікальним «цифровим відбитком» акустичного стану об'єкта в конкретний момент часу. Тривимірною поверхнею матриці ознак  $S$ , яка містить набір кепстральних коефіцієнтів для кожного часового кадру досліджуваного аудіосигналу наведена на рис.2. Така структура даних є оптимальною для подальшої кластеризації, оскільки вона поєднує в собі високу інформативність та мінімальний обчислювальний об'єм, що дозволяє реалізувати систему ідентифікації в режимі реального часу.

На тривимірній моделі спектрально-часового рельєфу акустичного сигналу вісь ординат відображає номери мел-кепстральних коефіцієнтів, які описують тембр звуку та форму огинаючої спектра, ігноруючи дрібномасштабні шумові складові. Вісь абсцис представляє часову розгортку процесу, де кожен стовпець матриці є окремим зрізом

звукового поля в конкретний момент часу, кількість яких визначається загальною тривалістю запису та кроком сегментації. Вісь аплікату демонструє амплітуду кепстральних енергій. Характерні піки та підняття на поверхні  $S$  чітко локалізують фазу максимального наближення, де концентрація енергії у відповідних кепстральних смугах досягає максимуму. Така візуалізація підтверджує, що алгоритм успішно порівнює вектори ознак (стовпці матриці) між собою. Подібність структури стовпців у межах певних часових інтервалів створює умови для їх подальшого об'єднання алгоритмом  $K$  – середніх у гомогенні кластери («Шум», «Наближення», «Проїзд», «Віддалення»), забезпечуючи високу достовірність автоматизованої сегментації фаз руху.

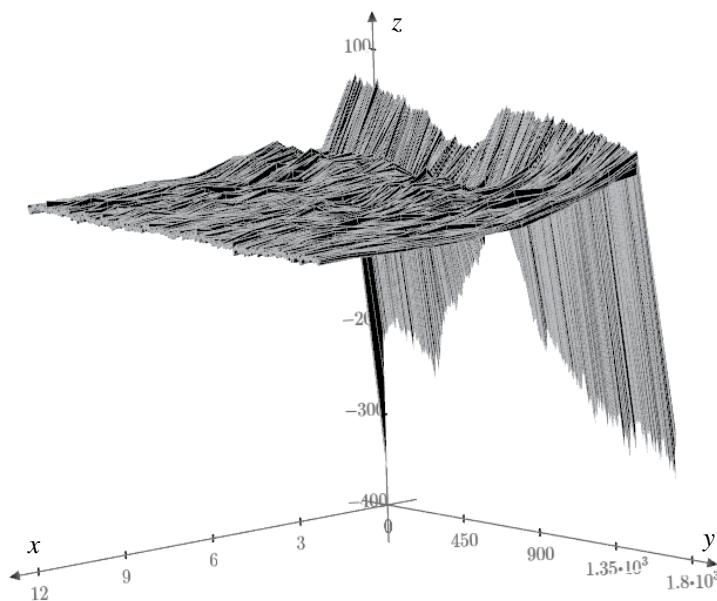


Рисунок 2 – Тривимірна поверхня матриці ознак  $S$

Візуалізація матриці ознак  $S$  у вигляді тривимірної поверхні демонструє чітку часову динаміку акустичного портрета рухомого об'єкта. Найбільша амплітудна варіативність спостерігається у низькочастотних кепстральних коефіцієнтах (1–4), що підтверджує їх пріоритетну роль у формуванні унікального цифрового образу об'єкта. Наявність характерних рельєфних зон дозволяє автоматизовано розділяти сигнал на стадії шум, наближення, проїзд та віддалення з високим ступенем достовірності за допомогою алгоритму  $K$  – середніх (7–9). На основі обчисленої матриці мелкепстральних коефіцієнтів алгоритм розділив аудіосигнал на 4 кластери, кожен з яких має чітку фізичну інтерпретацію. Розподіл акустичних кадрів за кластерами наведено на рис.3.

Аналіз результатів кластеризації дозволяє виділити чотири ключові сегменти, що відповідають просторовому положенню рухомого об'єкта відносно точки спостереження:

Кластер «Фоновий шум» (рис. 3,а) охоплює початкову ділянку сигналу, що в кепстральному просторі характеризується низькою дисперсією енергій та відсутністю ви-

ражених доміантних частот та відповідає навколишньому звуковому фону та знаходженні об'єкта на великій відстані.

Кластери «Наближення» (рис. 3,б) та «Віддалення» (рис. 3,г) включають вектори ознак, що описують динамічну зміну спектра. Спостерігається характерний дрейф центроїдів кластера, викликаний наростанням потужності та зміною спектрального складу внаслідок ефекту Доплера.

Кластер «Проїзд» (рис. 3,в) характеризується групою векторів з найвищими значеннями кепстральних коефіцієнтів та відповідає моменту проїзду об'єкта поблизу мікрофона, де акустичний портрет є найбільш насиченим та стабільним.

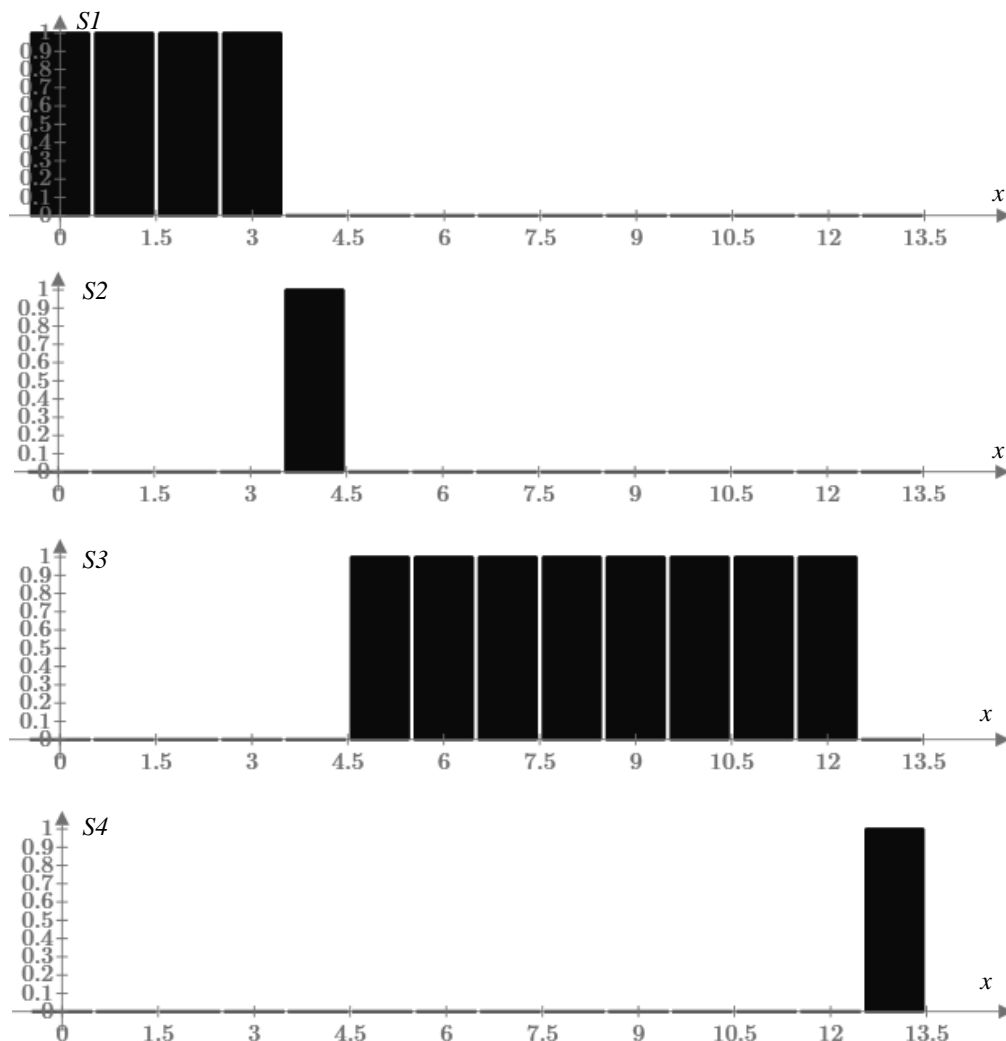


Рисунок 3 – Розподіл акустичних кадрів за кластерами: а) кластер «Фоновий шум», б) кластер «Наближення», в) кластер «Проїзд», г) кластер «Віддалення»

Алгоритм продемонстрував високу чутливість до моментів зміни станів. На відміну від класичних порогових методів, що базуються лише на амплітуді, метод  $K$  – середніх у мел-кепстральному просторі дозволив чітко зафіксувати часові межі фаз навіть за умов асиметричного згасання звуку. Точки переходу між кластерами на часовій осі збігаються з результатами візуального аналізу осцилограми, що підтверджує достовірність ідентифікації. Завдяки використанню евклідової відстані в декорельова-

ному просторі ознак, алгоритм ігнорує вплив короткочасних імпульсних завад, які були виявлені на початкових етапах аналізу. Такі перешкоди або ігноруються як статистичні викиди, або поглинаються найбільш наближеним кластером, не створюючи помилкових сегментів руху. Отримані результати підтверджують, що поєднання мел-кепстрального аналізу з ітераційною кластеризацією забезпечує стійку автоматизовану ідентифікацію станів рухомого об'єкта.

Важливим результатом проведеного дослідження є отримані спектральні портрети центроїдів, що представляють еталонні образи чотирифазної моделі руху об'єкта (рис. 4). Вісь ординат представлена у відносних децибелах, а вісь абсцис відображає центральні частоти мел-фільтрів. Візуалізація центроїдів кластерів у кепстральному просторі підтверджує високу сепарабельність станів та ефективність обраної комбінації методів мел-кепстрального аналізу та  $K$  – середніх для задач ідентифікації. Графічний аналіз свідчить про те, що сформовані кластери є лінійно роздільними, що є критично важливим для стабільної роботи автоматизованих систем класифікації.

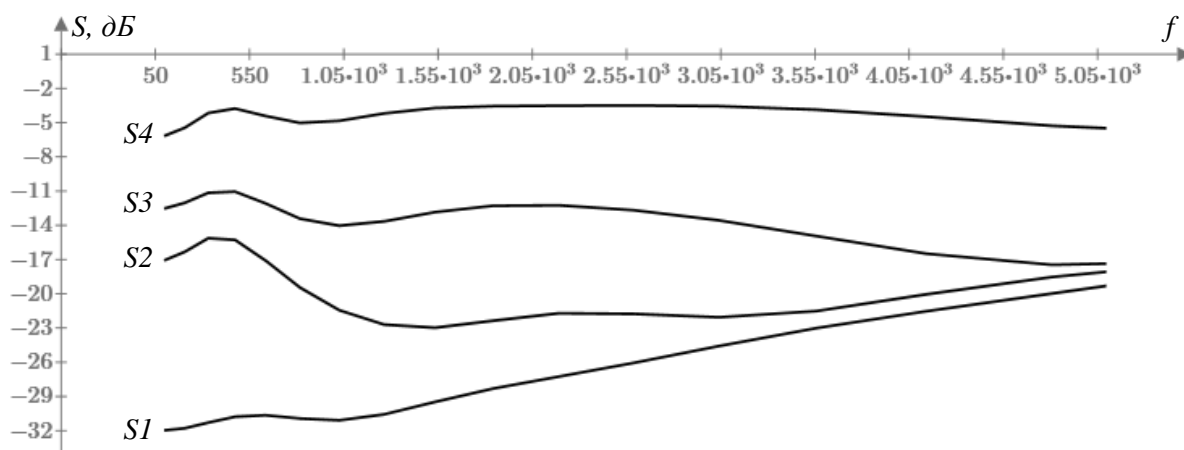


Рисунок 4 – Спектральні портрети центроїдів

Між граничними станами  $S1$  (шум) та  $S4$  (максимальне наближення) спостерігається амплітудна різниця понад 25 дБ. Це гарантує високу надійність розрізнення фаз руху навіть в умовах зашумленого промислового середовища. Перетин характеристик кластерів  $S2$  (наближення) та  $S3$  (віддалення) у високочастотній області (понад 5 кГц) вказує на схожість акустичних властивостей об'єкта на значних відстанях. Проте ідентифікація цих станів залишається достовірною завдяки суттєвим відмінностям у низькочастотному діапазоні, де зосереджена основна енергія механічних вузлів.

Кожен центроїд відображає унікальний спектральний відбиток конкретної фази руху. Кластер  $S4$  відповідає точці максимального наближення, характеризується найвищим енергетичним рівнем ( $-4 \dots -6$ ) дБ та рівномірним широкосмуговим спектром. Це свідчить про повну реєстрацію акустичного випромінювання: від низькочастотних вібрацій двигуна до високочастотного шуму тертя шин об поверхню. Кластер  $S1$  відображає пасивний стан системи або рівень фонового шуму ( $-20 \dots -32$ ) дБ відносно піку. Спектральний нахил у бік високих частот підтверджує домінування білого шуму

навколишнього середовища за відсутності корисного сигналу. Кластери  $S_2$  та  $S_3$  ідентифікують фази віддаленого руху.

**Висновки.** Запропонований підхід базується на припущенні, що кожен рухомий об'єкт у процесі функціонування генерує специфічне акустичне поле. Динаміка зміни цього поля дозволяє не лише ідентифікувати тип об'єкта, а й класифікувати стадії його просторового переміщення відносно точки спостереження за допомогою аналізу нестационарних спектральних характеристик. Високе співвідношення сигналу та шуму забезпечує стабільну роботу алгоритму виділення мел-кепстральних ознак. Явна нестационарність сигналу повністю обґрунтовує доцільність використання віконного швидкого перетворення Фур'є для коректного відображення спектральної динаміки. При цьому наявність поодиноких імпульсних завад на початкових секундах запису вимагає особливої уваги під час кластеризації методом  $K$  – середніх, оскільки такі сплески можуть формувати окремі мікрокластери перешкод або потребувати поглинання кластером фоновому шуму для підвищення достовірності ідентифікації. Отримані спектральні портрети центроїдів доводять, що запропонований метод дозволяє не просто фіксувати наявність рухомого об'єкта, а й детально сегментувати процес його переміщення. Це відкриває можливості для створення адаптивних систем автоматизації, здатних прогнозувати час проїзду та ідентифікувати режими роботи об'єкта за його цифровим відбитком.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. O. Polyvoda, H. Rudakova, I. Kondratieva et al. Digital Acoustic Signal Processing Methods for Diagnosing Electromechanical Systems. *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing*. Cham: Springer, 2020. Vol. 1020. P. 97–109.  
DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_7).
2. Бондаренко М. Е., Іващенко Г. С. Використання послідовності методів попередньої обробки в системах голосової ідентифікації. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2025. № 2. С. 90–96.  
DOI: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.090>.
3. Rudresh M. D., Latha A. S., Suganya J., Nayana C. G. Performance analysis of speech digit recognition using cepstrum and vector quantization. *2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT)*. Mysuru, India, 2017. P. 1–6.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICEECCOT.2017.8284580>.
4. Савула А. А., Коротинський А. П. Застосування звукових ознак для моніторингу техніко-експлуатаційного стану промислового обладнання. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Т. 35 (74), № 6. Ч. 2. С. 215 – 220. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/30>
5. Alkhatib B., Kamal Eddin M. M. W. Voice Identification Using MFCC and Vector Quantization. *Baghdad Science Journal*. 2020. Vol. 17, Iss. 3 (Suppl.). P. 1019–1026.  
DOI: [https://doi.org/10.21123/bsj.2020.17.3\(Suppl.\).1019](https://doi.org/10.21123/bsj.2020.17.3(Suppl.).1019).

6. Abdul Z., Al-Talabani A. Mel Frequency Cepstral Coefficient and its Applications: A Review. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 122136–122158.

DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223444>.

#### REFERENCES

1. Polyvoda, O., Rudakova, H., Kondratieva, I., Rozov, Y., & Lebedenko, Y. (2020). Digital Acoustic Signal Processing Methods for Diagnosing Electromechanical Systems. In V. Lytvynenko, S. Babichev, W. Wójcik, O. Vynokurova, S. Vyshemyrskaya, & S. Radetskaya (Eds.), *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI 2019. Advances in Intelligent Systems and Computing* (Vol. 1020, pp. 97–109). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-26474-1_7)

2. Bondarenko, M. E., & Ivashchenko, H. S. (2025). Vykorystannia poslidovnosti metodiv poperednoi obrobky v systemakh holosovoi identyfikatsii [Using a sequence of preprocessing methods in voice identification systems]. *Systems of Control, Navigation and Communication. Collection of Scientific Works*, (2), 90–96. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2025.2.090>

3. Rudresh, M. D., Latha, A. S., Suganya, J., & Nayana, C. G. (2017). Performance analysis of speech digit recognition using cepstrum and vector quantization. *2017 International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer, and Optimization Techniques (ICEECCOT)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/ICEECCOT.2017.8284580>

4. Savula, A. A., & Korotynskyi, A. P. (2024). Zastosuvannia zvukovykh oznak dlia monitorynhu tekhniko-eksploatatsiinoho stanu promyslovoho obladdannia [Application of sound features for monitoring the technical and operational state of industrial equipment]. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, 35(74), 6(2), pp 215 – 220. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.6.2/30>

5. Alkhatib, B., & Kamal Eddin, M. M. W. (2020). Voice Identification Using MFCC and Vector Quantization. *Baghdad Science Journal*, 17(3 Suppl.), 1019–1026. [https://doi.org/10.21123/bsj.2020.17.3\(Suppl.\).1019](https://doi.org/10.21123/bsj.2020.17.3(Suppl.).1019)

6. Abdul, Z., & Al-Talabani, A. (2022). Mel Frequency Cepstral Coefficient and its Applications: A Review. *IEEE Access*, 10, 122136–122158.

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3223444>

Received 23.04.2026.

Accepted 24.04.2026.

Published 30.04.2026

#### ***Intelligent method for moving object identification based on feature clustering in the mel-frequency cepstral domain***

*The implementation of intelligent monitoring systems in modern industrial automation and advanced transportation networks requires the development of highly reliable methods for moving object identification. The relevance of this study is driven by the necessity to create systems capable of stable operation under conditions of intense acoustic noise, limited optical visibility, and dynamic environmental parameters. Traditional amplitude-based sound processing methods prove to be ineffective due to their high sensitivity to signal non-stationarity and the Doppler effect, which prevents accurate segmentation of an object's dynamic states as the distance to the sensor changes.*

*The objective of this work is to develop and scientifically substantiate a method for identifying motion phases based on the complex application of Mel-frequency cepstral analysis and intelligent clustering. The proposed approach is based on the synthesis of Short-Time Fourier Transform) algorithms using the Hamming window to minimize spectral leakage, psychoacoustic filtering based on Mel-scale filters, and Discrete Cosine Transform for feature disintegration and decorrelation in the cepstral domain.*

*The research methodology is based on converting a non-stationary acoustic signal into a time-frequency representation followed by the calculation of Mel-Frequency Cepstral Coefficients. This allowed for the formation of a multidimensional feature matrix that acts as a unique "digital fingerprint" of the object. A significant advantage of this method is its invariance to amplitude (loudness) fluctuations, achieved through logarithmic energy scaling within each critical frequency band. For automatic state recognition, an unsupervised machine learning method – K-means clustering – was applied, allowing for the grouping of feature vectors into compact centroids corresponding to specific motion phases.*

*The scientific novelty of the results lies in the improvement of the dynamic state segmentation process for moving objects by transitioning from time-domain characteristic analysis to analysis within the cepstral feature space. It has been experimentally confirmed that distinct differentiation is possible between the phases of approach, transit (point of closest proximity), and departure of the object. The results demonstrate high computational stability and speed, ensuring the possibility of integrating the method into local microprocessor-based automated control systems, PLCs, and real-time technical diagnostic systems. The practical value of the work lies in the potential to create autonomous acoustic detectors for monitoring industrial equipment and traffic flows without the need for expensive video surveillance systems.*

*Keywords: moving object identification, mel-frequency cepstral coefficients, clustering, monitoring automation, acoustic signal, digital signal processing, industrial automation, motion phase segmentation.*

**Поливода Оксана Валеріївна** – к.т.н., доцент, доцент кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки, Херсонський національний технічний університет.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6323-3739>

**Назмєєв Ілля Олегович** – аспірант кафедри автоматизації, робототехніки і мехатроніки, Херсонський національний технічний університет.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-2360-0347>

**Polyvoda Oksana Valeriivna** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics, Kherson National Technical University.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-6323-3739>

**Nazmieiev Illia Olehovych** – Postgraduate Student at the Department of Automation, Robotics and Mechatronics, Kherson National Technical University.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0008-2360-0347>

## ВПЛИВ ОБ'ЄМНОЇ ЩІЛЬНОСТІ ЕНЕРГІЇ (VED) НА ПОРИСТІСТЬ ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВУ INCONEL 718, ВИГОТОВЛЕНОГО МЕТОДОМ ЛАЗЕРНОГО ПЛАВЛЕННЯ В ПОРОШКОВОМУ ШАРІ

*Анотація.* У роботі досліджено вплив об'ємної щільності енергії (VED) на формування пористості та механічні властивості жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718, виготовленого методом LPBF. Актуальність дослідження зумовлена тим, що в більшості сучасних робіт відносна щільність (пористість) матеріалу розглядається як основний критерій якості адитивно виготовлених виробів, тоді як вплив варіації VED за умови досягнення однакового рівня відносної щільності залишається недостатньо вивченим. Дослідні зразки були виготовлені при двох значеннях VED - 48,7 та 57,6 Дж/мм<sup>3</sup> - із забезпеченням однакової високої відносної щільності на рівні 99,8 %. Проведено металографічний аналіз полірованих шліфів із кількісною оцінкою пористості, а також випробування на розтягування. Встановлено, що за однакової відносної щільності характер типу та розміру пор суттєво відрізняється залежно від значення VED. При більш високому значенні VED спостерігається підвищена кількість дрібних пор розміром 2-3 мкм, тоді як при меншому значенні VED фіксується їх менша загальна кількість, проте наявні поодинокі пори більшого розміру (до 17-20 мкм). Показано, що зміна VED практично не впливає на тимчасовий опір. Водночас виявлено суттєвий вплив VED на пластичні характеристики: зразки, виготовлені при VED 57,6 Дж/мм<sup>3</sup>, характеризуються підвищеними значеннями відносного подовження та звуження порівняно із зразками, отриманими при VED 48,7 Дж/мм<sup>3</sup>. Отримані результати підтверджують, що оцінка якості LPBF-виробів лише за показником відносної щільності є недостатньою. Варіація VED може зумовлювати відмінну морфологію дефектів та різний рівень пластичних властивостей навіть при однаковій відносній щільності матеріалу. Це вказує на необхідність комплексного підходу до оптимізації режимів LPBF з урахуванням не лише щільності, але й стабільності та відтворюваності механічних характеристик.

*Ключові слова:* LPBF; Inconel 718; об'ємна щільність енергії; пористість; відносна щільність.

**Вступ.** Лазерне плавлення в порошковому шарі (LPBF) є доволі відомою технологією в області адитивного виробництва. Дана технологія базується на пошаровому сплавленні порошкового шару під дією лазерного променя про що і вказує її назва. Застосування даної технології з кожним роком набуває все ширшого застосування в авіаційній, енергетичній та медичній галузях.

Наразі в області LPBF-технології спостерігається значна наукова активність [1–4]. Основні дослідження зосереджені на оптимізації технологічних параметрів з метою підвищення продуктивності процесу за одночасного забезпечення високої відносної щільності та структурної однорідності матеріалу (баланс «швидкість–якість», так званий компроміс (час–щільність) [1-2], удосконаленні режимів термічного оброблення, розширенні номенклатури перспективних матеріалів для LPBF [3-4], а також розроблення інтегрованих підходів до виготовлення виробів складної геометрії, що передбачають варіативне керування параметрами процесу залежно від локального перерізу та функціонального призначення деталі.

**Аналіз останніх досліджень.** Як згадується в більшості робіт по LPBF-технології [5-6], дана технологія має відмінності по мікроструктурі матеріалу порівняно з традиційними способами виробництва [7]. Це пов'язано з формуванням текстурованої структури через високу швидкість охолодження ( $10^5 - 10^7$  K/c) під час кристалізації. Слід зазначити, що дана технологія може застосовувати різні технологічні параметри при збереженні високої відносної щільності.

У численних дослідженнях значна увага приділялася впливу основних технологічних параметрів процесу LPBF, зокрема потужності, швидкості сканування, відстані між треками та номінальній товщині шару на відносну щільність виробу [8-9] та механічні властивості. Однак встановлення узагальнених закономірностей з урахуванням одночасної дії всіх зазначених факторів є складним через їх взаємозалежність та багатопараметричний характер процесу. У зв'язку з цим широкого застосування набув показник об'ємної щільності енергії (Volumetric Energy Density, VED) [2, 10], що визначається як відношення потужності лазерного випромінювання до швидкості сканування, відстані між сусідніми треками та номінальної товщини шару порошку, що застосовувалась під час виготовлення (1):

$$VED = P/v \cdot h \cdot t \quad (1)$$

де  $P$  - потужність лазера, Вт;  $v$  - швидкість сканування, мм/с;  $h$  - відстань між треками, мм;  $t$  – номінальна товщина шару, мм. Використання цього параметра дозволяє звести декілька змінних до єдиного узагальненого показника та спростити аналіз взаємозв'язку між енергетичними умовами процесу та відносною щільністю матеріалу. Водночас слід враховувати, що різні комбінації технологічних параметрів можуть забезпечувати близькі значення VED і водночас приводити до відмінностей у формуванні ванни розплаву та структурно-фазовому стані матеріалу навіть за однакової досягнутої відносної щільності [11-12].

Таким чином, вплив варіації VED за умови забезпечення однакового рівня відносної щільності на формування механічних властивостей залишається недостатньо дослідженим. У зв'язку з цим, у даній роботі здійснено оцінку впливу різних значень VED на механічні характеристики зразків, виготовлених методом LPBF, із забезпеченням однакової високої відносної щільності.

**Мета дослідження.** Метою роботи є встановлення впливу різних значень об'ємної щільності енергії (VED) на характер пористості та механічні властивості зраз-

ків зі сплаву Inconel 718, виготовлених методом LPBF, за умови забезпечення високої відносної щільності матеріалу.

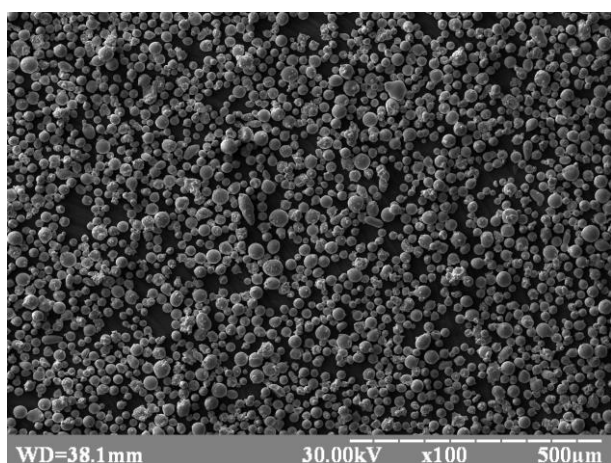
**Методика проведення досліджень.** В рамках дослідження використано дослідні зразки на розтягування, що виготовлені з застосуванням 3D-принтеру виробництва ТОВ «Адитивні лазерні технології України».

Дослідні зразки були виготовлені з жароміцного сплаву Inconel 718, хімічний склад якого представлено в таблиці 1. Гранулометричний аналіз дослідного порошку показав, що розмір частинок складає  $20 \pm 15$  мкм, результати даного аналізу представлені на рисунку 1.

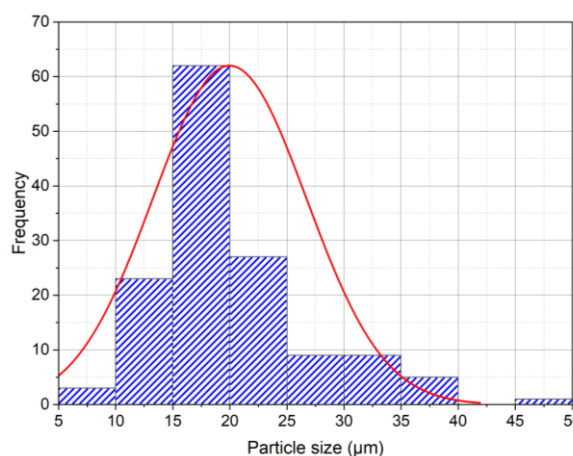
Таблиця 1

Хімічний склад дослідних зразків з Inconel 718, % ваг.

Cr	C	Cu	Nb	Al	Mo	Ti	Co	Si	Mn	Fe	Ni
17,8	0,02	0,06	5,5	0,5	3,0	0,9	0,3	0,07	0,08	18,0	основа



а



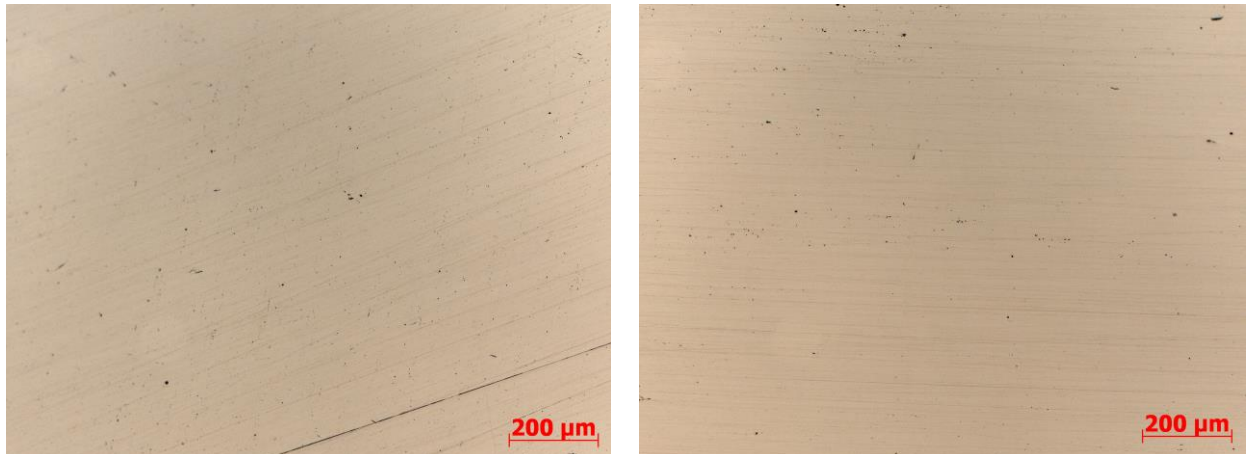
б

Рисунок 1 – Аналіз частинок порошку (а), гранулометричний аналіз (б)

Дослідні зразки для визначення границі міцності, відносного подовження та звуження виготовлялись у вертикальному напрямленні, мали циліндричну форму з діаметром робочої зони 6 мм та відстанню між базисами 25 мм. Виготовлені зразки відповідали різним розрахованим VED, а саме  $48,7 \text{ Дж/мм}^3$  та  $57,6 \text{ Дж/мм}^3$  (по 3 зразка на кожену серію), та мали відносну щільність на рівні 99,8%. Перед випробуванням дослідні зразки були попередньо механічно оброблені на токарному верстаті HAAS до чистових розмірів з діаметром в робочій зоні 5 мм. Визначення механічних властивостей виконувалося за допомогою випробувальної машини RHYWE, з максимальним навантаженням 3т та швидкістю переміщення траверси 1мм/с.

Аналіз відносної щільності було виконано металографічним способом на дослідних зразках, що попередньо були підготовлені механічним способом (за стандартною методикою шліфування та полірування), з застосуванням оптичного мікроскопа Axiovert 200 Mmat як відношення площі пор до загальної площі поля зору.

**Результати досліджень.** В результаті аналізу мікроструктури дослідних зразків (рис. 2) було встановлено, що відносна щільність обох зразків складає 99,8%.



48,7Дж/мм<sup>3</sup>

57,6Дж/мм<sup>3</sup>

Рисунок 2 – Дослідні зразки в полірованому стані

При більш детальному аналізі дослідних зразків в полірованому стані було встановлено, що при однаковій відносній щільності 99,8% кількість виявлених пор в дослідному зразку, що був виготовлений з VED 48,7 Дж/мм<sup>3</sup>, менше, ніж в зразку, що був виготовлений з VED 57,6 Дж/мм<sup>3</sup>. Проведений аналіз (рис. 3) показав, що кількість пор в дослідному зразку з VED 57,6 Дж/мм<sup>3</sup> має відносно велику кількість пор розміром в діапазоні 2-3 мкм, а максимальний розмір виявленої пори склав 11 мкм. В той же час в дослідному зразку з VED 48,7 Дж/мм<sup>3</sup> присутня менша кількість пор в діапазоні 2-4 мкм, але було виявлено поодинокі пори розміром 17 мкм та 20 мкм. Це вказує, що досягнення відносної щільності на близькому рівні 99,8% при застосуванні різних VED можлива, але досягнення даної щільності може мати варіативний характер через утворення пор різного розміру в залежності від застосованих технологічних параметрів.

Було виконано випробування на розтягування з визначенням границі міцності, відносного подовження та відносного звуження (табл. 2). З врахуванням близької відносної щільності дослідних зразків для аналізу отриманих даних після випробувань на розтягування було проведено аналіз відхилень від середніх отриманих значень кожної серії зразків. Це дозволить зробити спробу в визначенні впливу різних VED при близькій відносній щільності.

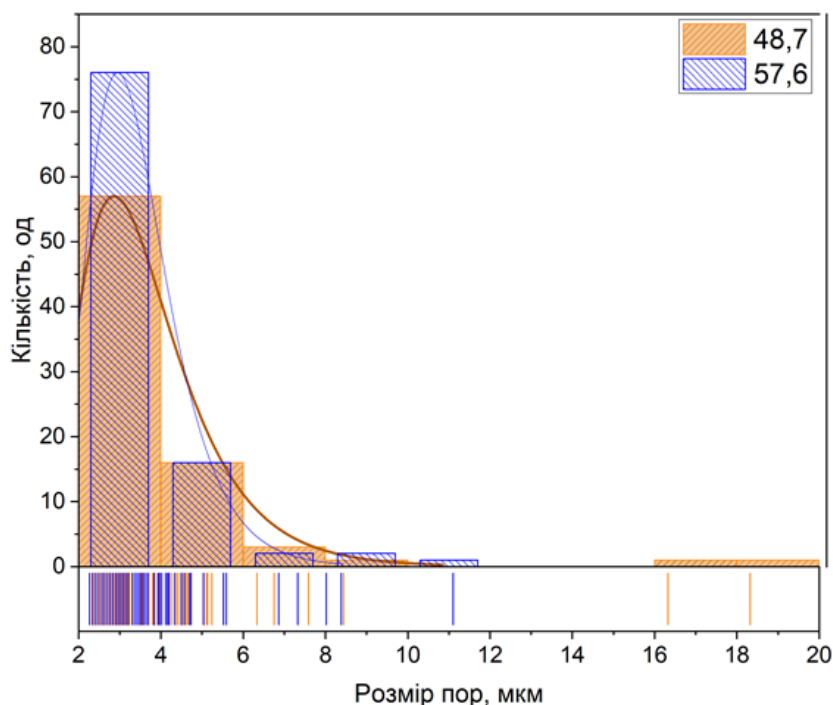


Рисунок 3 – Аналіз пористості дослідних зразків виготовлених при VED 48,7 Дж/мм<sup>3</sup> та VED 57,6 Дж/мм<sup>3</sup>

Таблиця 2

Механічні властивості дослідних зразків

№ зразка	VED, Дж/мм <sup>3</sup>	$\sigma_b$ , МПа	$\Delta^*$ , %	$\delta$ , %	$\Delta^*$ , %	$\psi$	$\Delta^*$ , %
1	48,7	952,9	+0,03	24,5	-1,06	24,3	-4,5
2	48,7	945,9	-0,69	20,6	-16,55	24,3	-4,5
3	48,7	958,9	+0,65	29,1	+14,97	27,7	+8,26
<b>Середнє</b>		<b>952,5</b>		<b>24,7</b>		<b>25,45</b>	
1	57,6	952,4	+0,01	33,0	-0,68	30,7	-4,65
2	57,6	954,4	+0,22	32,8	-1,29	29,1	-9,83
3	57,6	949,9	-0,24	33,9	+1,92	36,9	+14,49
<b>Середнє</b>		<b>952,2</b>		<b>33,2</b>		<b>32,2</b>	

\*  $\Delta$  – відхилення від середнього значення, %

В результаті проведених досліджень з визначення механічних властивостей встановлено, що середні значення по границі міцності мають близькі значення і не продемонстрували статистично значущих відмінностей характеристики. При аналізі пластичних характеристик встановлено, що дослідні зразки, які виготовленні при VED 57,6 Дж/мм<sup>3</sup>, мають на 8,5% середні значення вище, ніж середні значення відносного подовження зразків, які виготовлені при VED 48,7 Дж/мм<sup>3</sup>, та на 6,75% вище, ніж середні значення відносного звуження в зразку з VED 48,7 Дж/мм<sup>3</sup>. Отримані попередні результати свідчать про наявність залежності механічних властивостей від варіації

об'ємної щільності енергії (VED) навіть за умови однакової високої відносної щільності матеріалу.

При аналізі величини відхилень від середніх значень кожної з груп зразків, було виявлено, що дослідні зразки, виготовлені при VED 48,7 Дж/мм<sup>3</sup>, мають більші коливання по значенням відносно один одного порівняно зі зразками, виготовленими при VED 57,6 Дж/мм<sup>3</sup>.

У зв'язку з цим виникає необхідність у проведенні поглиблених досліджень із залученням розширеної статистичної вибірки, мікроструктурного аналізу та оцінки характеру дефектності з метою встановлення кількісних залежностей у ланцюгу «технологічні параметри (VED) - відносна щільність - механічні властивості». Такий підхід дозволить сформуванню науково обґрунтованих критеріїв оптимізації режимів LPBF-процесу не лише за показником відносної щільності, але й з урахуванням стабільності та відтворюваності механічних характеристик, що визначає подальший напрямок досліджень.

#### **Висновки:**

1. Встановлено, що при близькому рівні відносної щільності характер пористості суттєво відрізняється залежно від значення VED: при VED 57,6 Дж/мм<sup>3</sup> спостерігається більша кількість дрібних пор (2–3 мкм), тоді як при VED 48,7 Дж/мм<sup>3</sup> виявлено меншу загальну кількість дефектів, проте наявні поодинокі пори більшого розміру (до 17–20 мкм). Це свідчить про відмінності у механізмах формування дефектів при різних енергетичних режимах.

2. Встановлено, що зміна VED за умови збереження високої відносної щільності практично не впливає на тимчасовий опір, середні значення якого для обох серій зразків є близькими та не демонструють статистично значущих відмінностей. Водночас виявлено суттєвий вплив VED на пластичні характеристики матеріалу: зразки, виготовлені при VED 57,6 Дж/мм<sup>3</sup>, характеризуються підвищеними значеннями відносного подовження та звуження (на 8,5 % та 6,75 % відповідно) порівняно із зразками, отриманими при VED 48,7 Дж/мм<sup>3</sup>.

3. Отримані результати підтверджують, що оцінка якості LPBF-виробів лише за показником відносної щільності є недостатньою, оскільки різні енергетичні режими можуть формувати відмінну морфологію дефектів і, відповідно, різний рівень пластичних властивостей навіть при однаковій щільності.

4. Встановлена залежність механічних властивостей від варіації VED за однакової відносної щільності вказує на необхідність подальших комплексних досліджень із розширеною статистичною вибіркою та детальним аналізом мікроструктурних особливостей з метою формування науково обґрунтованих критеріїв оптимізації режимів LPBF-процесу.

#### **ЛІТЕРАТУРА**

1. Letenneur M., Kreitchberg A., Brailovski V. Optimization of Laser Powder Bed Fusion Processing Using a Combination of Melt Pool Modeling and Design of Experiment Approaches: Density Control. *J. Manuf. Mater. Process.* 2019, 3, 21.  
<https://doi.org/10.3390/jmmp3010021>

2. Letenneur M., Brailovski V., Kreitchberg A., Paserin V., Bailon-Poujol I. Laser powder bed fusion of water-atomized iron-based powders: Process optimization. *J. Manuf. Mater. Process.* 2017, 1, 23. <https://doi.org/10.3390/jmmp1020023>
3. Seede R., Shoukr D., Zhang B., Whitt A., Gibbons S., Flater P., Elwany A., Arróyave R., Karaman I. An Ultra-High Strength Martensitic Steel Fabricated using Selective Laser Melting Additive Manufacturing: Densification, Microstructure, and Mechanical Properties. *Acta Materialia*. 2020. 186. 199-214. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.037>
4. Rae C. Alloys by Design: Modelling next generation superalloys. *Materials Science and Technology*. 2009. 25(4). 479-487. <https://doi.org/10.1179/174328408X372056>
5. Chernyshikhin S.V., Firsov D.G., Shishkovsky I.V. Selective Laser Melting of Pre-Alloyed NiTi Powder: Single-Track Study and FE Modeling with Heat Source Calibration. *Materials*. 2021, 14, 7486. <https://doi.org/10.3390/ma14237486>
6. Antikainen A., Reijonen J., Lagerbom J., Lindroos M., Pinomaa T., Lindroos T. Single-Track Laser Scanning as a Method for Evaluating Printability: The Effect of Substrate Heat Treatment on Melt Pool Geometry and Cracking in Medium Carbon Tool Steel. *JMEPEG*. 2022. 31. 8418–8432. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06826-0>
7. Реалізація технології селективного лазерного плавлення в Україні. Аджамський С. В., Кононенко Г. А., Подольський Р. В., Бадюк С. І. Київ, Наукова думка, 2022, 120 с. (ISBN 978-966-00-1856-3) <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>
8. Hebert R.J. Viewpoint: Metallurgical aspects of powder bed metal additive manufacturing. *Journal of Materials Science*. 2016. 51(3). 1165–1175.
9. Yadroitsev I, Gusarov A, Yadroitsava I, Smurov I. Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. 210(12). 1624–1631.
10. Wang S., Wang L., Liu J., Yang R., Li J., Wang G. Effects of laser energy density on morphology features and microstructures of the single molten track in selective laser melting. *Front. Mater.* 2023. 10. 1110844. <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1110844>
11. Dilip J.J.S., Anam M. A., Pal D., Stucker B. A short study on the fabrication of single track deposits in SLM and characterization. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International. Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*. P. 1644-1659.
12. Teng C., Gong H., Szabo A., Dilip J. J. S., Ashby K., Zhang S., Patil N., Pal D., Stucker B. Simulating Melt Pool Shape and Lack of Fusion Porosity for Selective Laser Melting of Cobalt Chromium Components. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2017. 139. P. 011009-1 -011009-11. <https://doi.org/10.1115/1.4034137>

#### REFERENCES

1. Letenneur M., Kreitchberg A., Brailovski V. (2019). Optimization of Laser Powder Bed Fusion Processing Using a Combination of Melt Pool Modeling and Design of Experiment Approaches: Density Control. *J. Manuf. Mater. Process*, 3, 21. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp3010021>

2. Letenneur M., Brailovski V., Kreitchberg A., Paserin V., Bailon-Poujol I. (2017). Laser powder bed fusion of water-atomized iron-based powders: Process optimization. *J. Manuf. Mater. Process*, 1, 23. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp1020023>
3. Seede R., Shoukr D., Zhang B., Whitt A., Gibbons S., Flater P., Elwany A., Arróyave R., Karaman I. (2020). An Ultra-High Strength Martensitic Steel Fabricated using Selective Laser Melting Additive Manufacturing: Densification, Microstructure, and Mechanical Properties. *Acta Materialia*, 186. 199-214. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2019.12.037>
4. Rae C. (2009). Alloys by Design: Modelling next generation superalloys. *Materials Science and Technology*, 25(4). 479-487. DOI: <https://doi.org/10.1179/174328408X372056>
5. Chernyshikhin S.V., Firsov D.G., Shishkovsky I.V. (2021). Selective Laser Melting of Pre-Alloyed NiTi Powder: Single-Track Study and FE Modeling with Heat Source Calibration. *Materials*, 14, 7486. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14237486>
6. Antikainen A., Reijonen J., Lagerbom J., Lindroos M., Pinomaa T., Lindroos T. (2022). Single-Track Laser Scanning as a Method for Evaluating Printability: The Effect of Substrate Heat Treatment on Melt Pool Geometry and Cracking in Medium Carbon Tool Steel. *JMEPEG*, 31. 8418–8432. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06826-0>
7. Adjamskiy, S., Kononenko, G., Podolskyi, R., Badyuk, S. (2022) Implementation Of Selective Laser Melting Technology In Ukraine. Kyiv, Naukova Dumka. 116p. [in Ukrainian]. DOI: <https://doi.org/10.15407/978-966-00-1856-3>
8. Hebert R.J. (2016). Viewpoint: Metallurgical aspects of powder bed metal additive manufacturing. *Journal of Materials Science*, 51(3). 1165–1175.
9. Yadroitsev I, Gusarov A, Yadroitsava I, Smurov I. (2010). Single track formation in selective laser melting of metal powders. *Journal of Materials Processing Technology*, 210(12). 1624–1631.
10. Wang S., Wang L., Liu J., Yang R., Li J., Wang G. (2023). Effects of laser energy density on morphology features and microstructures of the single molten track in selective laser melting. *Front. Mater.*, 10. 1110844. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmats.2023.1110844>
11. Dilip J.J.S., Anam M. A., Pal D., Stucker B. (2016). A short study on the fabrication of single track deposits in SLM and characterization. *Solid Freeform Fabrication 2016: Proceedings of the 26th Annual International. Solid Freeform Fabrication Symposium – An Additive Manufacturing Conference*. P. 1644-1659.
12. Teng C., Gong H., Szabo A., Dilip J. J. S., Ashby K., Zhang S., Patil N., Pal D., Stucker B. (2017). Simulating Melt Pool Shape and Lack of Fusion Porosity for Selective Laser Melting of Cobalt Chromium Components. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 139. P. 011009-1 -011009-11. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4034137>

Received 23.04.2026.

Accepted 24.04.2026.

Published 30.04.2026

***Effect of volume energy density (VED) on the porosity and mechanical properties of Inconel 718 alloy manufactured by laser powder bed fusion***

*The work investigates the effect of volumetric energy density (VED) on the formation of porosity and mechanical properties of the heat-resistant nickel alloy Inconel 718 manufactured by the LPBF method. The relevance of the study is due to the fact that in most*

*modern works, the relative density (porosity) of the material is considered as the main criterion for the quality of additively manufactured products, while the effect of VED variation under the condition of achieving the same level of relative density remains insufficiently studied. The test specimens were manufactured at two VED values - 48.7 and 57.6 J/mm<sup>3</sup> - ensuring the same high relative density at the level of 99.8%. Metallographic analysis of polished sections with a quantitative assessment of porosity, as well as tensile tests, was carried out. It was established that at the same relative density, the nature of the type and size of pores differs significantly depending on the VED value. At a higher VED value, an increased number of small pores with a size of 2-3 μm is observed, while at a lower VED value, their total number is smaller, but there are single pores of larger size (up to 17-20 μm). It is shown that the change in VED has practically no effect on the temporary resistance. At the same time, a significant effect of VED on plastic characteristics was found: samples manufactured at a VED of 57.6 J/mm<sup>3</sup> are characterized by increased values of relative elongation and narrowing compared to samples obtained at a VED of 48.7 J/mm<sup>3</sup>. The obtained results confirm that assessing the quality of LPBF products only by the relative density indicator is insufficient. Variation in VED can cause different defect morphology and different levels of plastic properties even with the same relative density of the material. This indicates the need for a comprehensive approach to optimizing LPBF modes, taking into account not only density, but also stability and reproducibility of mechanical characteristics.*

*Keywords: LPBF; Inconel 718; volumetric energy density; porosity; relative density.*

**Аджамський Сергій Вікторович** – PhD, технічний директор LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інституту транспортних систем і технологій Національної академії наук України, Дніпро, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6095-8646>

**Кононенко Анна Андріївна** - докт. техн. наук, ст. досл., старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, професор НТУ «Дніпровська Політехніка», інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», Дніпро, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>

**Подольський Ростислав Вячеславович** – докт. філ., старший науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, старший науковий співробітник Інститут прикладних систем управління НАН України, інженер-матеріалознавець LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інститут прикладних систем управління НАН України, Дніпро, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>

**Бадюк Сергій Іванович** – канд.техн.наук, інженер-технолог LLC «Additive Laser Technology of Ukraine», старший науковий співробітник Інститут прикладних систем управління НАН України, Дніпро, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1074-3057>

**Подольська Олена Анатоліївна** – науковий співробітник Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України, Дніпро, Україна.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4032-4275>

**Adjamskiy Sergey** – PhD, Technical Director of Additive Laser Technology of Ukraine LLC, senior researcher at the Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6095-8646>

**Kononenko Ganna** - Doct. technical science, sen. researcher, scientific secretary of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, Professor of NTU "Dnipro Polytechnic", materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7446-4105>

**Podolskiy Rostyslav** – PhD, senior researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Senior Researcher at the Institute of Applied Control Systems NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0288-0641>

**Baduk Sergey** – Cand. technical science, materials engineer LLC Additive Laser Technology of Ukraine, Process engineer LLC "Additive Laser Technology of Ukraine", senior researcher, Institute of Applied Control Systems, NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1074-3057>

**Podolska Olena** – researcher of the Institute of Iron and Steel of Z.I. Nekrasov NAS of Ukraine, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4032-4275>

О.Г. Гончаров, І.М. Удовик, В.В. Гнатушенко

## КОНСТРУЮВАННЯ ЗАПИТІВ ДЛЯ КЛАСИФІКАЦІЇ ЗЕМНОГО ПОКРИВУ БЕЗ НАВЧАЛЬНИХ ПРИКЛАДІВ ЗА ДОПОМОГОЮ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ МОВНИХ МОДЕЛЕЙ НА ЗНІМКАХ SENTINEL-2

*Анотація.* Класифікація земного покриття за супутниковими знімками є важливим завданням екологічного моніторингу, містобудівного планування та агрономії. Мульти-модальні мовні моделі (VLM) дозволяють виконувати цю задачу без розмічених тренувальних даних, проте під час їх застосування виявлено системну проблему - хибну класифікацію за кольором сегментаційної маски (color leakage), коли модель ухвалює рішення не за вмістом зображення, а за довільним кольором маски. Метою роботи є розробка протоколу конструювання запитів для усунення цього явища та порівняння двох стратегій обробки супутникових знімків (багатокластерної та однокластерної). Запропоновано протокол із чотирьох інваріантів (TCI першим, сіра маска, заборона кольорових описів, фіксований JSON-формат) та зіставлено Варіант А (багатокластерний) і Варіант Б (однокластерний) на зображеннях Sentinel-2, що дозволило усунути хибну класифікацію за кольором маски та призвело до підвищення частки відповідей у коректному JSON-форматі (FCR) з  $\approx 60\%$  до  $97\%$ . Варіант Б досягає  $mIoU \approx 13,2\%$ , що на  $6,1$  відсоткового пункту перевищує Варіант А; найкраща комбінація (UNet-encoder + GPT-4.1, Варіант Б) досягає  $46,2\%$   $mIoU$ .

*Ключові слова:* промт інженеринг, класифікація без навчання, VLM, модель, зображення, дистанційне зондування, Sentinel-2.

**Постановка проблеми.** Складання карт земного покриття за супутниковими знімками є одним з важливих завдань екологічного моніторингу, містобудівного планування та агрономії [1, 18]. Як правило, таку задачу розв'язують методами семантичної сегментації на основі глибокого навчання, зокрема з використанням архітектури U-Net [2] та її модифікацій [3]. Але ці методи потребують великих розмічених наборів даних і чималих обчислювальних ресурсів, особливо при переході до нових територій чи умов зйомки.

Сучасні VLM GPT-4.1 [4], Claude 3.7 Sonnet, Gemini 2.5 Pro [5], Grok-2 Vision запропонували інший підхід: класифікацію без попередньо розмічених навчальних даних. Ці моделі здатні аналізувати супутникові знімки з довільним набором категорій [6, 7], що робить їх зручним засобом автоматизованої обробки геопросторових даних.

У роботі [8] нами було представлено обробний ланцюг, що об'єднував сегментацію без учителя та класифікацію за допомогою VLM, який на сцені Sentinel-2 для півд-

ня України досяг 46,2 % mIoU без жодних тренувальних даних. Разом із тим, виявилось, що формулювання запиту до моделі суттєво впливає на якість результатів. Щоб зрозуміти, які саме властивості запиту визначають якість класифікації, у роботі виконано аналіз типових помилок, що виникають при його конструюванні. Це дозволило виявити та пояснити явище хибної класифікації за кольором маски (color leakage), провести детальний розбір побудови запитів у двох варіантах обробки та запропонувати набір правил формування запиту для його усунення. Кількісне зіставлення двох стратегій обробки супутникових знімків (багатокластерної та однокластерної) дозволило сформулювати практичний перелік рекомендацій для відтвореного конструювання запитів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Мультиmodalьні мовні моделі привернули увагу дослідників дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) завдяки можливості працювати з довільним набором категорій. В ранніх дослідженнях [6] було показано, що моделі типу CLIP здатні класифікувати аерознімки без розмічених прикладів. Спеціалізовані моделі RS-CLIP [7] та Falcon [9] розвинули цей підхід, адаптувавши його до супутникових даних через предметно-орієнтоване доналаштування. Sosa та ін. [10] запропонували сегментацію на основі текстових описів для ДЗЗ, що не потребує навчання.

Liю та ін. [11] створили RSHBench, набір даних для виявлення галюцинацій у мультиmodalьних мовних моделях при роботі із супутниковими знімками. Їхні результати підтвердили, що сучасні VLM схильні до певних типів помилок при аналізі даних ДЗЗ, і це додатково обґрунтовує потребу в ретельно розроблених протоколах запиту.

Класифікація без навчальних прикладів у дистанційному зондуванні спрямована на перенесення семантичних знань на нові класи без предметно-специфічного налаштування моделі. Класичний підхід, запропонований Romera-Paredes і Torr [12], ґрунтується на використанні атрибутних векторів для узагальнення характеристик класів. Подальші дослідження, зокрема робота Saha та ін. [13], розширюють цей підхід шляхом адаптації візуально-мовних моделей із використанням текстових описів класів. Barzilai та ін. [14] запропонували набір методів, спрямованих на покращення узагальнювальної здатності VLM у задачах дистанційного зондування Землі. Отримані результати узгоджуються з нашим підходом, особливо щодо важливості формалізації протоколу запиту.

Конструювання запитів (prompt engineering) полягає у цілеспрямованому формулюванні текстових вхідних даних для моделі з метою отримати бажану відповідь. Після публікації White та ін. [15], де було каталогізовано типові шаблони запитів для ChatGPT, ця тематика набула поширення серед дослідників. Wei та ін. [16] продемонстрували, що послідовне міркування (chain-of-thought prompting) помітно покращує здатність моделей до складних висновків. У мультиmodalьних моделях існує додаткова проблема, пов'язана з взаємовпливом між модальностями: кольорові артефакти маски можуть перетягувати «увагу» моделі з реального вмісту зображення. Тому явище хибної класифікації за кольором маски (color leakage) для класифікації земного покриття без навчальних прикладів є предмет дослідження.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є підвищення точності та коректності структурованого виводу (FCR) при класифікації земного покриття без навчальних при-

ладів на супутникових зображеннях Sentinel-2 за рахунок розробки протоколу конструювання запитів до мультимодальних мовних моделей, що усуває явище хибної класифікації за кольором маски та встановлює фіксовану структуру вхідних даних і вихідних відповідей моделі.

**Викладення основного матеріалу дослідження.**

**Постановка задачі та архітектура обробного ланцюга.** Задача класифікації з-многого покриття без навчальних прикладів полягає в автоматичному присвоєнні тематичних категорій ділянкам супутникового знімка без попереднього навчання на спеціалізованих даних. Вхідними даними слугує мультиспектральний знімок Sentinel-2 L2A (9 каналів: B02, B03, B04, B05, B06, B07, B8A, B11, B12). Обробний ланцюг складається з двох послідовних етапів, що ілюструються на рисунку 1.

Спочатку проводиться сегментація без учителя, під час якої знімок розбивається на  $k$  однорідних кластерів за спектральними ознаками методами K-means, SOM, watershed або з використанням CNN-ознак (UNet-encoder). На виході формується зображення у натуральних кольорах (TCI - True Color Image, яке сформовано з каналів B04, B03, B02) і маски сегментації.

Другий етап передбачає класифікацію за допомогою VLM: для кожного сегмента мовна модель визначає категорію із таксономії ESA WorldCover 2021 [19] (11 класів: «Деревна рослинність» - Tree cover, «Сільськогосподарські угіддя» - Cropland, «Забудова» - Built-up, «Постійні водні об'єкти» - Permanent water bodies та інші), ступінь впевненості та текстове обґрунтування. Якість оцінюється через порівняння з еталонними масками WorldCover за метриками mIoU та FCR (частка відповідей у коректному форматі).

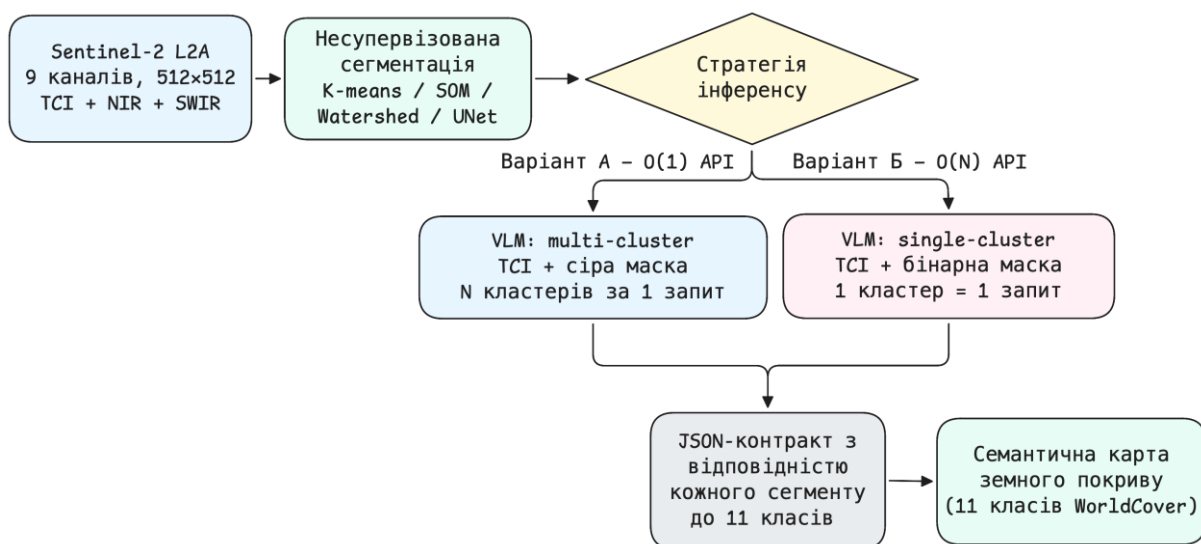


Рисунок 1 – Архітектура обробного ланцюга для класифікації земного покриття без навчальних прикладів

**Явище хибної класифікації за кольором маски: виявлення і аналіз.** Під час розробки обробного ланцюга [8] виявилась системна проблема: моделі класифікували сегменти не за змістом супутникового зображення, а за довільними кольорами сегмента-

ційної маски. Це явище - хибна класифікація за кольором маски - мало характерну картину: синій кластер модель відносила до категорії «Постійні водні об'єкти», зелений — до «Деревна рослинність» і так далі, незалежно від того, що насправді зображено на знімку.

Аналіз показав, що в початковій реалізації збіглись чотири несприятливі обставини. Кольорову маску з окремими RGB-відтінками для кожного кластера подавали до моделі першою. У запиті був докладний опис RGB-значень кожного кластера (на зразок «Cluster 2: RGB(31, 119, 180) — dark blue»). Визначення класів WorldCover включали кольорові ознаки («Dark green patterns» для Tree cover). Попри явну заборону, врахування кольору маски залишалось можливим. Таблиця 1 представляє типові помилки хибної класифікації за кольором маски у початковому протоколі, дозволяючи прослідкувати задокументовані приклади. В усіх трьох випадках модель повністю ігнорувала зміст знімка і спиралася виключно на колір маски. Характерна ознака: у полі відповіді модель посилається на атрибути маски ("blue area", "green area"), а не на геометричні чи текстурні ознаки зображення.

Таблиця 1

Типові помилки хибної класифікації за кольором маски у початковому протоколі (задокументовані приклади)

Кластер	Колір у масці	Реальний клас (ТСІ)	Класифікація VLM	Обґрунтування моделі
Cluster 2	Синій #1F77B4	Built-up (за- будова)	Постійні водні об'єк- ти	"Dark blue area corresponds to water"
Cluster 0	Зелений #2CA02C	Cropland (ріллі)	Деревна рослинність	"Green area shows dense vegetation"
Cluster 1	Оранжевий #FF7F0E	Tree cover (ліс)	Сільськогосподарські угіддя	"Orange region typical of agricultural fields"

**Протокол із чотирьох інваріантів.** Щоб системно усунути хибну класифікацію за кольором маски, розроблено протокол з чотирма обов'язковими правилами. Кожне правило спрямоване на конкретну виявлену причину, як показано в таблиці 2.

Зображення ТСІ подається першим у послідовності API-виклику, а маска другим — це найважливіше з правил. Дослідження показали, що моделі VLM приділяють більше уваги першому зображенню [8], тому правильний порядок дає моделі змогу сформулювати первинне уявлення за реальним знімком, а не за артефактами маски.

Другий інваріант полягає у перетворенні маски у відтінки сірого: кожен кластер  $k$  отримує рівень сірого  $gray(k) = \text{round}(255 \cdot k / (K - 1))$ , де  $K$  — загальна кількість кластерів. Разом із маскою надається XML-блок `<grayscale_mask_legend>`, що однозначно

прив'язує номер кластера до відповідного відтінку сірого. Таким чином колір маски повністю виключається як потенційний сигнал для моделі.

Запит не містить жодних кольорових описів: ані кластерів, ані категорій WorldCover (третій інваріант). Заборону сформульовано абсолютно: «Ignore every pixel colour in the mask. The mask serves only as a region outline; its colours are random and meaningless.»

Щодо формату виводу, останній, четвертий, інваріант вимагає виключно валідного JSON із фіксованими ключами category, confidence, reasoning. Поле reasoning обмежене до 25 слів і має посилатися на видимі ознаки зображення TCI (форму, текстуру, контекст, сусідні об'єкти), а не на атрибути маски.

Таблиця 2

Еволюція протоколу: причина помилки → зміна → вимірюваний ефект

Виявлена причина	Зміна у протоколі	Ефект
Кольорова маска активує асоціативні скорочення	Маска → відтінки сірого + <legend>	Усунення хибної класифікації за кольором
Маска першою — attention bias	TCI першим у послідовності API	Семантика формується за TCI
Кольорові описи у запиті	Видалити всі RGB-описи та кольорові дескриптори	Виключити кольорові асоціації
Розмита заборона кольорів	Абсолютна явна заборона у запиті	Зниження хибної класифікації
Нестабільний вивід (вільний текст)	Лише JSON, фіксовані ключі, reasoning ≤ 25 слів	FCR: 60 % → 97 %

**Стратегії обробки та побудова запитів.** Протокол реалізовано у двох варіантах обробки з принципово різною побудовою запиту. Повні тексти запитів наведено у Додатках А і В; тут розглядаються ключові проектні рішення. Рисунок 2 ілюструє відмінності у структурі API-викликів.

Варіант А (багатокластерний) характеризується такими особливостями. Системне повідомлення явно задає роль моделі: «You are an expert remote sensing analyst... Your classification must be based SOLELY on analyzing the content in the original RGB satellite image. The colors in the segmentation mask are arbitrary.» Таке формулювання фіксує пріоритет зображення TCI ще до того, як модель побачить будь-які зображення.

Користувачке повідомлення передає зображення TCI (першим) і повну сіру маску (другим). XML-блок <grayscale\_mask\_legend> детально описує відповідність: Cluster 0 → gray level 0 (black), Cluster 1 → gray level 85, ..., Cluster N-1 → gray level 255. Модель отримує точну й однозначну легенду без жодних RGB-відтінків.

Завдання формулюється через блок TASK: «For each cluster label (0 to N-1) in the segmentation mask, decide which WorldCover land-cover category best describes the area as it appears in the ORIGINAL RGB satellite image. Return valid JSON only.» Слова

ORIGINAL, SOLELY та EXCLUSIVELY вжито навмисне, щоб підсилити семантичну прив'язку до зображення TCI при обробці інструкцій моделлю.

Формалізований формат відповіді вимагає ключі category, confidence ("high" | "medium" | "low") і reasoning (до 25 слів із посиланням на візуальні ознаки TCI). Обмеження у 25 слів працює ефективно: модель не формує розлогіх описів, у яких нерідко з'являються кольорові асоціації (на зразок "the blue tones suggest..."), а натомість наводить конкретні ознаки: текстуру, форму, сусідність.

Варіант Б (однокластерний) суттєво відрізняється. На відміну від Варіанту А, він не використовує системне повідомлення, натомість для кожного сегмента формується окреме користувацьке повідомлення. Такий підхід усуває ризик «забруднення контексту» між сегментами при великих N.

Принципова відмінність полягає в побудові маски: замість повної сірої маски модель отримує бінарну маску, де цільовий кластер k виділено білим (255), а решту зафарбовано чорним (0). Це суттєво спрощує задачу: модель точно бачить, який саме фрагмент зображення потрібно класифікувати. Зведене порівняння конструктивних відмінностей двох варіантів наведено в таблиці 3.

Таблиця 3

Конструктивні відмінності запитів у Варіанті А та Варіанті Б

Параметр	Варіант А (multi-cluster)	Варіант Б (однокластерний)
Системне повідомлення	Так (роль аналітика ДЗЗ)	Ні (роль вбудована в user msg)
Зображення у запиті	TCI + повна сіра маска	TCI + бінарна маска (1 кластер)
Легенда	<grayscale_mask_legend> (N рядків)	Не потрібна (лише cluster_id)
Заборона кольору	Загальна (для всієї маски)	Специфічна (WHITE ≠ snow/water)
JSON-вивід	{0: {...}, 1: {...}, ...} (N ключів)	{cluster_id: {...}} (1 ключ)
API-викликів / тайл	1 (O(1))	N (O(N)), типово 6–8
Середнє mIoU [8]	7,1 % ± 2,3 %	13,2 % ± 3,8 %
FCR	~65 %	~97 %

Заборону кольору сформульовано з урахуванням бінарної маски: «Ignore the colour of the mask completely. WHITE = location only. It does NOT mean snow, water, or any class.» Явна вказівка «WHITE ≠ snow» блокує найочевиднішу кольорову асоціацію, а саме білий колір із категоріями «Сніг і лід» або «Постійні водні об'єкти». Зіставлення ключових параметрів запитів наведено в таблиці 3.

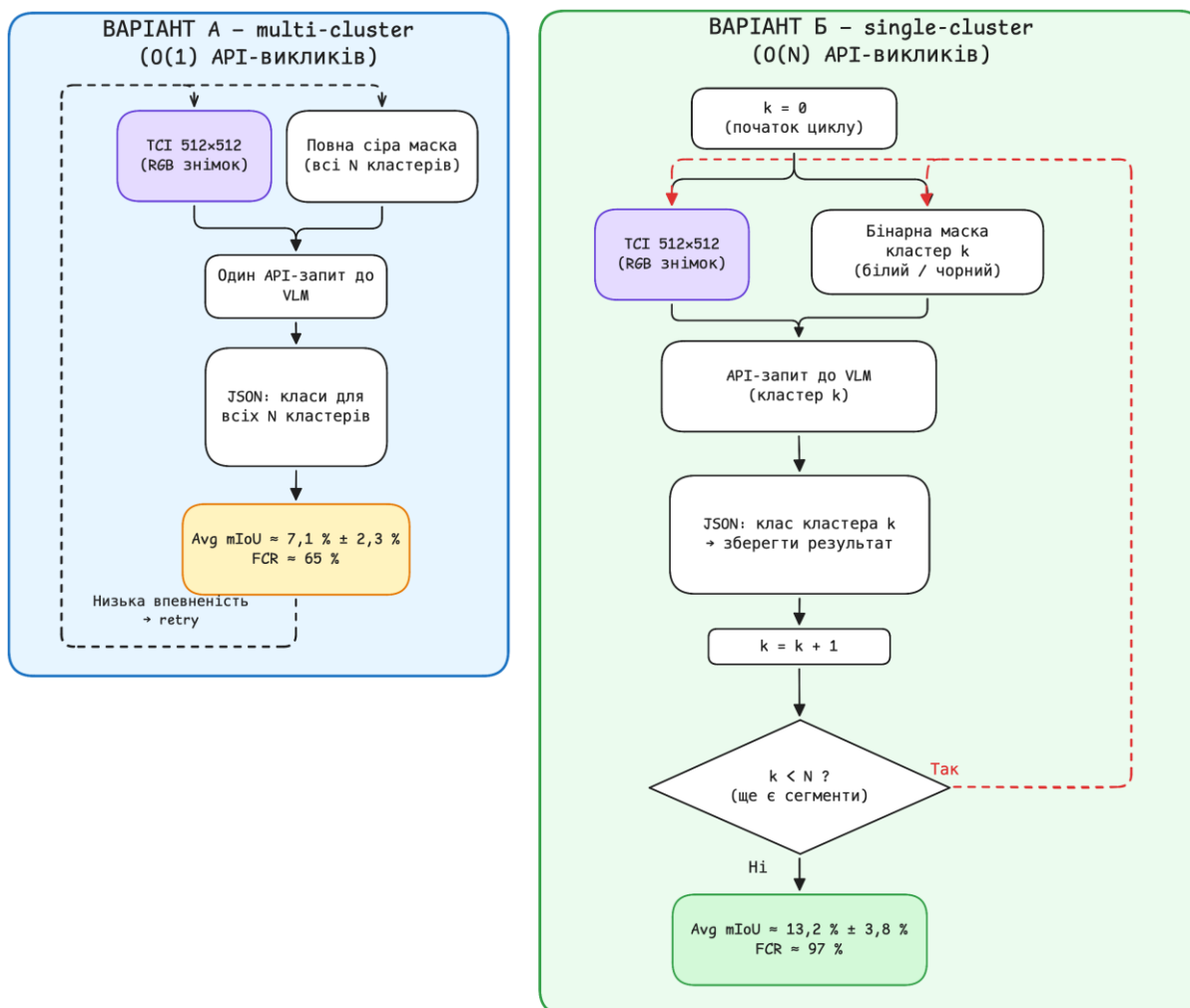


Рисунок 2 – Порівняння стратегій обробки: Варіант А (багатокластерний) та Варіант Б (однокластерний)

### Експерименти

**Умови проведення експериментів.** Експерименти проводились на сцені Sentinel-2 Level-2A з півдня України (фрагмент T36TWS, 5 червня 2023 р.). Використано 10 непересічних фрагментів розміром 512 × 512 пікселів, просторовий розподіл яких охоплює поля, водойми, забудову та деревну рослинність. Методи сегментації охоплювали K-means, SOM, watershed + K-means і UNet-encoder + K-means [17] (9 каналів, k = 6–8 кластерів). Мовні моделі включали GPT-4.1, Claude 3.7 Sonnet, Claude Sonnet 4, Gemini 2.5 Pro, o4-mini, GPT-4o, GPT-4.1-mini, Claude Opus 4, Grok-2 Vision (загалом 11 моделей). Еталоном слугувала карта ESA WorldCover 10m 2021 [19]. Метрики обчислювались як середнє ± стандартне відхилення по 10 фрагментах.

**Варіант А проти Варіанту Б: базове порівняння.** Таблиця 4 відтворює основні агреговані результати з роботи [8] для обох стратегій обробки при дотриманні протоколу (сіра маска, TSI першим, фіксований JSON-формат). Для порівняння подано також початковий (спрощений) протокол Варіанту А з кольоровою маскою.

Таблиця 4

Порівняння стратегій обробки (середнє по всіх VLM і методах, 10 фрагментів) [8]

Конфігурація	mIoU (mean ± std)	FCR	API-викликів / тайл
Варіант А, початковий протокол	6,6 % ± 2,1 %	~60 %	O(1)
Варіант А, протокол	7,1 % ± 2,3 %	~65 %	O(1)
Варіант Б, протокол	13,2 % ± 3,8 %	97 %	O(N)
Гібрид А→В, протокол	~15 %	97 %	O(1+0,15N)
Найкраща (CNN+GPT-4.1+Var B)	46,2 %	99 %	O(N)

З таблиці 4 видно, що протокол дає лише невелике покращення mIoU у Варіанті А (6,6 % → 7,1 %), але помітно підвищує FCR (частка відповідей у коректному форматі). Натомість при переході до Варіанту Б спостерігається відчутне зростання якості: +6,1 в. п. mIoU (7,1 % → 13,2 %). Ключова роль протоколу у Варіанті Б полягає в підвищенні FCR до 97 %. Варіант А, попри структурований формат відповіді, зберігає FCR на рівні ~65 %, оскільки модель мусить правильно сформулювати N ключів в одній відповіді; Варіант Б потребує лише 1 ключ на виклик, що суттєво спрощує задачу формату. Значення 46,2 % (n = 5, одинична конфігурація) є найкращим окремим результатом (UNet-encoder + GPT-4.1), а не середнє.

*Детальне порівняння VLM і методів сегментації (протокол, Варіант Б).* Таблиця 5 містить результати за методами та моделями при дотриманні протоколу у Варіанті Б (10 фрагментів, середнє ± стандартне відхилення). Найвищий mIoU демонструють GPT-4.1 (13,9 % ± 4,2 %) та Claude 3.7 Sonnet (13,8 % ± 3,9 %). За методами сегментації ранжування виглядає таким чином: UNet-encoder (11,8 % ± 2,7 %) > K-means (10,7 % ± 3,1 %) > watershed + K-means (10,1 % ± 2,8 %). Найкраща комбінація досягається при K-means + GPT-4.1 (17,2 % ± 5,1 %). Стовпець «Серед.» у таблиці 5 обчислено по всіх 11 VLM; у таблиці наведено 5 найкращих моделей.

Таблиця 5

Середній mIoU (%) за методом сегментації і VLM, протокол, Варіант Б, 10 фрагментів

Метод	GPT-4.1	Claude 3.7	Gemini 2.5	GPT-4o	o4-mini	Серед. (11 VLM)
K-means	17,2±5,1	16,5±4,8	13,0±3,7	13,4±4,1	16,5±4,6	10,7±3,1
SOM	10,8±3,2	11,8±3,5	7,9±2,5	8,6±2,8	10,7±3,0	9,4±2,6
Watershed+Kmeans	15,1±4,3	14,0±3,9	12,6±3,4	13,7±3,8	13,1±3,6	10,1±2,8
UNet+Kmeans	13,7±4,0	13,7±3,8	10,8±3,1	13,8±3,9	12,0±3,3	11,8±2,7
Watershed+NDVI	12,6±3,6	12,7±3,7	11,2±3,2	15,3±4,4	12,0±3,4	10,8±2,9

Для оцінки внеску кожного інваріанта протоколу, проведено покрокове дослідження з послідовним увімкненням змін. Таблиця 6 демонструє кумулятивний ефект при фіксованому методі (K-means) та моделі (GPT-4.1). За результатами аналізу, найбі-

льший внесок у підвищення FCR дає фіксований JSON-формат (інваріант iv), а у зменшення цієї помилки — перетворення маски у відтінки сірого (інваріант ii). Зміна порядку зображень (інваріант i) також дає помітний, хоча й менший ефект. З огляду на обмежений обсяг вибірки (5 фрагментів, один метод і одна модель) ці результати слід розглядати як орієнтовні. Повноцінне покомпонентне дослідження (щонайменше 250 стратифікованих фрагментів, перехресна валідація) заплановане як пріоритет наступного етапу роботи.

Таблиця 6

Покомпонентний аналіз: кумулятивний ефект інваріантів протоколу  
(K-means + GPT-4.1, Варіант Б, 5 фрагментів, попередня оцінка)

Конфігурація	mIoU	FCR	Color leakage
Базовий: кольорова маска, маска першою, вільний текст	~8 %	~55 %	Часто
+ сіра маска (інв. ii)	~11 %	~58 %	Рідко
+ TCI першим (інв. i)	~13 %	~60 %	Дуже рідко
+ заборона кольорів (інв. iii)	~14 %	~62 %	Поодинокі
+ JSON-формат (інв. iv) = повний протокол	~17 %	~97 %	Поодинокі

**Систематика помилок і аналіз за окремими класами.** Протягом дослідження виявлено чотири основні типи помилок, які потребують окремого розгляду.

Хибна класифікація за кольором маски (color leakage) як перший тип охоплює випадки, коли модель ухвалює рішення за кольором маски, а не за зображенням TCI. Цей тип помилки усувається інваріантами 1–3. За своєю природою це явище належить до так званого навчання на хибних ознаках (shortcut learning) [21]: модель пов'язує довільний колір маски з певним класом, ігноруючи зміст знімка. Задokumentований приклад з таблиці 1 демонструє випадок, коли кластер із синім кольором #1F77B4 потрапляє до класу «Постійні водні об'єкти» (Permanent water bodies) незалежно від того, що на відповідній ділянці зображено забудовану територію. Розроблений протокол (сіра маска + абсолютна заборона кольорових описів у запиті) усуває цей ефект системно. Залишкова проблема полягає в тому, що деякі відповіді у полі обґрунтування посилаються на яскравість відтінку ("bright gray area", "dark gray region") замість текстурних ознак зображення; це потребує подальшого вивчення. У початковому протоколі приблизно 30 % викликів містили хибне обґрунтування типу "blue area → water". Детальніші вимірювання планується провести на розширеній вибірці для всіх 11 класів таксономії WorldCover.

Другий тип міжсегментного забруднення виникає у Варіанті А, коли модель хибно переносить ознаки одного сегмента на сусідній. Ця проблема частково усувається переходом до Варіанту Б.

Збої формату (помилки FCR) як третій тип включає випадки, коли замість структурованого виводу з'являється вільний текст, неповний JSON або нестандартні ключі.

FCR зростає з ~60 % до 97 % при дотриманні протоколу. Рекомендований протокол при збої: спершу повторний запит із temperature = 0; при повторному збої повернення до Варіанту А; запис необробленої відповіді для подальшого аналізу завдяки інваріанту iv.

Четвертий тип, спектральна неоднозначність, виникає, коли класи «Деревна рослинність» Tree cover (0,2 % mIoU), «Чагарники» Shrubland (~0 %), «Трав'яні водноболотні угіддя» Herbaceous wetland (~0,9 %) мають подібні оптичні характеристики у зображенні TCI, і модель їх регулярно плутає. Це обмеження підходу, який спирається лише на зображення в натуральних кольорах (без каналів NIR, SWIR). Розподіл впевненості моделі у Варіанті Б показує, що «high» становить 94 % передбачень, «medium» - 4,5 %, «low» - менше 1 %. Передбачення із середнім рівнем впевненості здебільшого стосуються саме спектрально подібних класів («Чагарники» Shrubland, «Трав'яна рослинність» Grassland, «Відкритий ґрунт» Bare/sparse), тоді як 64 % передбачень із високою впевненістю припадають на «Сільськогосподарські угіддя» (Cropland). Модель частково калібрована, проте загалом надмірно впевнена (94 % «high» при фактичному mIoU < 5 % для більшості класів). Систематичне дослідження залежності між впевненістю моделі та реальною якістю заплановано на наступний етап.

**Обговорення.** Головний результат роботи полягає в тому, що Варіант Б (однокластерний) помітно перевершує Варіант А (приріст mIoU становить 6,1 процентного пункту, з 7,1 % до 13,2 %) і ця різниця навіть більша, ніж розкид між найкращою (GPT-4.1, 13,9 %) і найгіршою (Grok-2, ~4 %) моделями при однаковій стратегії обробки. Протокол є критично важливим фактором для одержання коректних результатів у Варіанті Б: без структурованого виводу FCR становить приблизно 60 %, що унеможливило автоматичну обробку. Покласовий розподіл mIoU для обох варіантів наведено в таблиці 7.

Таблиця 7

mIoU за класами WorldCover: Варіант А проти Варіанту В  
(протокол, усі VLM та методи, n = 5 фрагментів)

Клас WorldCover	Var A → Var B mIoU	Середній F1	Пікселів (×10 <sup>6</sup> )
Cropland	23,4 % → 46,9 % ± 9,1 %	53,9 %	~320
Permanent water bodies	5,6 % → 15,8 % ± 7,3 %	18,5 %	~45
Built-up	1,9 % → 1,8 % ± 1,2 %	3,2 %	~28
Bare / sparse vegetation	0,4 % → 0,8 % ± 0,6 %	1,4 %	~12
Herbaceous wetland	0,5 % → 0,9 % ± 0,7 %	1,5 %	~18
Grassland	2,7 % → 0,3 % ± 0,4 %	0,6 %	~22
Tree cover	2,5 % → 0,2 % ± 0,3 %	0,4 %	~24
Shrubland	0 % → 0,0 %	0,0 %	<1

Аналіз за окремими класами, представлений у таблиці 7, виявив цікаву закономірність: зростання mIoU при переході від Варіанту А до Варіанту В відбувається майже виключно за рахунок класу «Сільськогосподарські угіддя» (Cropland) (23,4 % → 46,9 %), тоді як інші класи або не покращуються, або навіть погіршуються («Трав'яна рослинність» Grassland 2,7 % → 0,3 %, «Деревна рослинність» Tree cover 2,5 % → 0,4 %).

Причина, як видається, полягає в тому, що клас «Сільськогосподарські угіддя» (Cropland) має унікальні геометричні ознаки на зображенні TSI (регулярні прямокутні поля, однорідні рядки), які модель розпізнає впевнено навіть без контексту сусідніх сегментів. Натомість для спектрально подібних класів рослинності ізольований кластер без контексту ускладнює розрізнення, і модель демонструє стійке зміщення на користь класу «Сільськогосподарські угіддя» Cropland (64 % передбачень із високою впевненістю у Варіанті Б). Щоб подолати це зміщення, потрібні додаткові спектральні канали (NIR, SWIR) або запит із багатомасштабним контекстом.

Явище хибної класифікації за кольором маски дійсно існує та добре задокументовано; при початковому протоколі воно закономірно спотворює результати. Його усунення за рахунок сірої маски та правильного порядку зображень є найважливішим одиничним покращенням. Покомпонентний аналіз (таблиця 6, попередній) вказує, що саме перетворення у відтінки сірого дає найбільший вплив. Цей результат узгоджується з висновками Geirhos та ін. [21] про те, що хибні зв'язки, закріплені у вагах моделі під час попереднього навчання, стійкі до текстових інструкцій і можуть бути усунені лише через зміну самого вхідного сигналу. Текстова заборона кольору («Ignore the colour of the mask») звертається до вищих шарів міркування моделі, тоді як перетворення у відтінки сірого діє на рівні низькорівневих ознак зображення, прибираючи шкідливий кольоровий сигнал ще до того, як він потрапить до візуального кодувальника. Водночас обидва механізми доповнюють один одного.

Явище міжсегментного забруднення у Варіанті А можна пояснити через механізми перехресної уваги у трансформерних VLM [20]. Коли модель одночасно отримує XML-легенду з  $N$  просторовими ідентифікаторами, матриця перехресної уваги між текстовими токенами і візуальними фрагментами мусить розподіляти ваги між  $N$  конкуруючими областями. Зі зростанням  $N$  частка уваги на кожен окремий сегмент зменшується, що спричиняє розмивання просторового фокусу, та пов'язане з відомою схильністю VLM до помилок при аналізі складних сцен із великою кількістю об'єктів [11]. На практиці це виглядає так: модель правильно розпізнає текстурні ознаки ріллі (регулярні борозни, рівномірний тон) для кластера № 1, але через «розмити» прив'язку між просторовими токенами і структурованими ключами записує результат у ключ кластера № 2 («Забудова» Built-up). Варіант Б усуває цю проблему за рахунок іншої архітектури запити: кожен API-виклик стосується одного кластера і одного структурованого ключа, що знімає будь-яку неоднозначність адресації.

Ключовим рішенням Варіанту Б для побудови запити є використання бінарної маски і явної вказівки «WHITE  $\neq$  snow/water», що блокують найнебезпечнішу кольорову асоціацію. Обмеження розміру поля обґрунтування у фіксованій схемі відповіді до 25 слів виявилось дієвим прийомом, що спонукає модель посилатися на текстурні ознаки зображення TSI замість кольорових характеристик маски.

Найвищий mIoU 46,2 % ( $n = 5$ , одинична конфігурація) — UNet-encoder + GPT-4.1 + Варіант Б — демонструє можливості підходу, проте це одинична комбінація, а не ти-

повий результат. Медіана по решті комбінацій при протоколі Варіанту Б розташовується у діапазоні 11–13 %.

Основні обмеження дослідження мають кількісне й методологічне значення. Експеримент охоплює одну сцену (Т36ТWS, південь України), що обмежує географічну узагальнюваність результатів. Крім того, використано лише зображення в натуральних кольорах без каналів NIR/SWIR, що позначається на здатності розрізнити спектрально подібні класи. Покомпонентний аналіз має попередній характер; детальне кількісне вимірювання ефектів кожного інваріанта заплановане на наступний етап. Ефект хибної класифікації за кольором маски описано якісно, детальне кількісне вимірювання частоти цього явища у плані. Запропонований підхід на основі зображення в натуральних кольорах обмежує розрізнення спектрально подібних класів рослинності, тому доцільно дослідити зображення у помилкових кольорах (NIR + SWIR + Red) та NDVI-підкладки як альтернативного або додаткового візуального входу.

Загрози валідності роботи стосуються трьох аспектів. Щодо внутрішньої валідності, покомпонентні конфігурації не є незалежними (кумулятивний план експерименту), що ускладнює ізольовану оцінку внеску окремого інваріанта. Водночас усі 5 фрагментів, що використовувались для аналізу компонент, походять з одного знімка (Т36ТWS, південь України, 05.06.2023), тому результати можуть не узагальнюватися на інші біоми, сезони та регіони з іншим розподілом класів. Примітно, що класи «Трав'яна рослинність» (Grassland) і «Деревна рослинність» (Tree cover) мають нульовий або близький до нуля mIoU в обох варіантах, що не дає змоги робити висновки про їх розпізнавання. Щодо валідності конструкту, метрика mIoU оцінює збіг із WorldCover 2021 (похибка розмітки  $\approx 10\%$  для деяких класів згідно з [19]); нульові значення для «Чагарники» (Shrubland) та «Водно-болотні угіддя» (Wetland) можуть частково відображати неточності в еталоні, а не лише обмеження моделі. Результати GPT-4.1 і Gemini 2.5 Pro можуть змінитися при оновленні API-версії моделей; використані версії зафіксовано у таблиці 4.

**Висновки.** У роботі розв'язано задачу підвищення точності (mIoU) та коректності структурованого виводу (FCR) при класифікації земного покриву без навчальних прикладів на знімках Sentinel-2 за рахунок розробки протоколу конструювання запитів до мультимодальних мовних моделей. Запропоновано протокол із чотирьох обов'язкових правил (ТСІ першим, сіра маска, заборона кольорових описів, фіксований JSON-формат), що усуває явище хибної класифікації за кольором маски (color leakage) та підвищує FCR з  $\approx 60\%$  до  $97\%$ .

Проведено порівняльний аналіз запропонованих стратегії обробки супутникових знімків. У Варіанті А (багатокластерному) модель отримує один API-виклик на всі кластери фрагмента одночасно, тоді як у Варіанті Б (однокластерному) формується окремий запит для кожного сегмента із бінарною маскою, де цільовий кластер виділено білим, а решта — чорним. Застосування Варіанта Б забезпечує підвищення mIoU з  $7,1\%$  до  $13,2\%$  порівняно з Варіантом А, що зумовлено сукупністю проєктних рішень.

Зокрема, використання бінарної маски зводить мультикласову задачу до локалізованої бінарної та спрощує візуальну інтерпретацію сегмента для моделі. Явна заборона

інтерпретації кольору усуває явище color leakage, а ізоляція кластерів між API-викликами унеможливує міжсегментне забруднення, притаманне Варіанту А. Додатково Варіант Б підвищує частку відповідей у коректному JSON, оскільки модель формує лише один JSON-об'єкт на запит замість N ключів в одній відповіді. Приріст mIoU досягається переважно за класом «Сільськогосподарські угіддя» (з 23,4 % до 46,9 %), тоді як вегетативні класи («Деревна рослинність», «Трав'яна рослинність») не покращуються, що вказує на обмеження підходу, який спирається лише на візуальні ознаки в натуральних кольорах (без каналів NIR, SWIR). Найвищий результат (mIoU = 46,2 %) досягнуто для комбінації UNet-encoder + GPT-4.1 + Варіант Б, проте це одинична конфігурація (n = 5 фрагментів), а не типовий результат по всіх VLM і методах сегментації.

Напрями подальших досліджень включають покомпонентний аналіз на розширеній вибірці ( $\geq 250$  фрагментів), використання додаткових спектральних каналів (NIR, SWIR) та валідацію підходу на географічно різноманітних сценах.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Heipke C., Rottensteiner F. Deep learning for geometric and semantic tasks in photogrammetry and remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2020. Vol. 166. P. 28—30. DOI: 10.1080/10095020.2020.1718003
2. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI 2015)*. Lecture Notes in Computer Science. 2015. Vol. 9351. P. 234—241. DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4\_28
3. Hnatushenko V., Honcharov O. Land cover mapping with Sentinel-2 imagery using deep learning semantic segmentation models. *Proceedings of the 11th International Scientific Conference "Information Technology and Implementation" (IT&I-2024)*, Kyiv, Ukraine, 20—21 November 2024. *CEUR Workshop Proceedings*. 2024. Vol. 3909. P. 1—18. URL: [https://ceur-ws.org/Vol-3909/Paper\\_1.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-3909/Paper_1.pdf)
4. Achiam J., Adler S., Agarwal S. et al. GPT-4 technical report. *arXiv preprint*. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2303.08774
5. Comanici G., Bieber E., Schaekermann M. et al. Gemini 2.5: Pushing the frontier with advanced reasoning, multimodality, long context, and next generation agentic capabilities. *arXiv preprint*. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2507.06261
6. Mall U., Phoo C. P., Liu M. K., Vondrick C., Hariharan B., Bala K. Remote sensing vision-language foundation models without annotations via ground remote alignment. *International Conference on Learning Representations (ICLR 2024)*. 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2312.06960
7. Li X., Wen C., Hu Y., Zhou N. RS-CLIP: Zero-shot remote sensing scene classification via contrastive vision-language supervision. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2023. Vol. 124. Art. 103497. DOI: 10.1016/j.jag.2023.103497

8. Hnatushenko V., Honcharov O., Heipke C. Zero-shot land-cover recognition via unsupervised classification and VLM inference on Sentinel-2 imagery. 46. Wissenschaftlich-Technische Jahrestagung der DGPF in Darmstadt : Publikationen der DGPF. 2026. Band 34.
9. Yao K., Xu N., Yang R. et al. Falcon: A remote sensing vision-language foundation model (technical report). arXiv preprint. 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2503.11070
10. Sosa J., Rukhovich D., Kacem A., Aouada D. Enabling training-free text-based remote sensing segmentation. arXiv preprint. 2026. DOI: 10.48550/arXiv.2602.17799
11. Liu Y., Zhang J., Wang D. et al. Seeing clearly without training: Mitigating hallucinations in multimodal LLMs for remote sensing. arXiv preprint. 2026. DOI: 10.48550/arXiv.2603.02754
12. Romera-Paredes B., Torr P. An embarrassingly simple approach to zero-shot learning. Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning (ICML). PMLR. 2015. Vol. 37. P. 2152—2161. URL: <https://proceedings.mlr.press/v37/romera-paredes15.html>
13. Saha O., Van Horn G., Maji S. Improved zero-shot classification by adapting VLMs with text descriptions. Proceedings of IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2024. P. 17542—17552. DOI: 10.48550/arXiv.2401.02460
14. Barzilai A., Gigi Y., Helmy A. et al. A recipe for improving remote sensing VLM zero-shot generalization. International Conference on Learning Representations (ICLR 2025). 2025. DOI: 10.48550/arXiv.2503.08722
15. White J., Fu Q., Hays S. et al. A prompt pattern catalog to enhance prompt engineering with ChatGPT. arXiv preprint. 2023. DOI: 10.48550/arXiv.2302.11382
16. Wei J., Wang X., Schuurmans D. et al. Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2022). 2022. Vol. 35. DOI: 10.48550/arXiv.2201.11903
17. Hnatushenko V., Kundenko P., Tsaryk V., Dmytriieva I. Comparative analysis of activation functions in U-Net for binary water segmentation using Sentinel-2 imagery. Proceedings of CoLInS-2025. CEUR Workshop Proceedings. 2025. Vol. 3983. Paper 11. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3983/paper11.pdf>
18. Hnatushenko V., Zhurba A., Zimoglyad A., Ostrovska K. Research on environmental changes based on fractal characteristics of satellite images. Proceedings of MoDaST 2025. CEUR Workshop Proceedings. 2025. Vol. 4005. P. 62—71. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-4005/paper5.pdf>
19. Zanaga D., Van De Kerchove R., Daems D. et al. ESA WorldCover 10m 2021 v200. Zenodo. 2022. DOI: 10.5281/zenodo.7254221
20. Alayrac J. B., Donahue J., Luc P. et al. Flamingo: A visual language model for few-shot learning. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS 2022). 2022. Vol. 35. P. 23716—23736. DOI: 10.48550/arXiv.2204.14198
21. Geirhos R., Jacobsen J. H., Michaelis C. et al. Shortcut learning in deep neural networks. Nature Machine Intelligence. 2020. Vol. 2. P. 665—673. DOI: 10.1038/s42256-020-00257-z

## REFERENCES

1. Heipke, C., & Rottensteiner, F. (2020). Deep learning for geometric and semantic tasks in photogrammetry and remote sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 166, 28–30. <https://doi.org/10.1080/10095020.2020.1718003>
2. Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention (MICCAI 2015)* (Vol. 9351, pp. 234–241). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4\\_28](https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4_28)
3. Hnatushenko, V., & Honcharov, O. (2024). Land cover mapping with Sentinel-2 imagery using deep learning semantic segmentation models. In *Proceedings of the 11th International Scientific Conference "Information Technology and Implementation" (IT&I-2024)* (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3909, pp. 1–18). [https://ceur-ws.org/Vol-3909/Paper\\_1.pdf](https://ceur-ws.org/Vol-3909/Paper_1.pdf)
4. Achiam, J., Adler, S., Agarwal, S., et al. (2023). GPT-4 technical report. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.08774>
5. Comanici, G., Bieber, E., Schaeckermann, M., et al. (2025). Gemini 2.5: Pushing the frontier with advanced reasoning, multimodality, long context, and next generation agentic capabilities. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2507.06261>
6. Mall, U., Phoo, C. P., Liu, M. K., Vondrick, C., Hariharan, B., & Bala, K. (2024). Remote sensing vision-language foundation models without annotations via ground remote alignment. In *International Conference on Learning Representations (ICLR 2024)*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2312.06960>
7. Li, X., Wen, C., Hu, Y., & Zhou, N. (2023). RS-CLIP: Zero-shot remote sensing scene classification via contrastive vision-language supervision. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 124, 103497. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103497>
8. Hnatushenko, V., Honcharov, O., & Heipke, C. (2026). Zero-shot land-cover recognition via unsupervised classification and VLM inference on Sentinel-2 imagery. In *Proceedings of the 46th Annual Conference of the DGPF, Darmstadt. Publikationen der DGPF, Band 34*.
9. Yao, K., Xu, N., Yang, R., et al. (2025). Falcon: A remote sensing vision-language foundation model (technical report). arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.11070>
10. Sosa, J., Rukhovich, D., Kacem, A., & Aouada, D. (2026). Enabling training-free text-based remote sensing segmentation. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2602.17799>
11. Liu, Y., Zhang, J., Wang, D., et al. (2026). Seeing clearly without training: Mitigating hallucinations in multimodal LLMs for remote sensing. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2603.02754>
12. Romera-Paredes, B., & Torr, P. (2015). An embarrassingly simple approach to zero-shot learning. In *Proceedings of the 32nd International Conference on Machine Learning* (Vol. 37, pp. 2152–2161). PMLR. <https://proceedings.mlr.press/v37/romera-paredes15.html>

13. Saha, O., Van Horn, G., & Maji, S. (2024). Improved zero-shot classification by adapting VLMs with text descriptions. In Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR 2024) (pp. 17542–17552). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.02460>
14. Barzilai, A., Gigi, Y., Helmy, A., et al. (2025). A recipe for improving remote sensing VLM zero-shot generalization. In International Conference on Learning Representations (ICLR 2025). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.08722>
15. White, J., Fu, Q., Hays, S., et al. (2023). A prompt pattern catalog to enhance prompt engineering with ChatGPT. arXiv preprint. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2302.11382>
16. Wei, J., Wang, X., Schuurmans, D., et al. (2022). Chain-of-thought prompting elicits reasoning in large language models. In Advances in Neural Information Processing Systems (Vol. 35). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2201.11903>
17. Hnatushenko, V., Kundenko, P., Tsaryk, V., & Dmytrieva, I. (2025). Comparative analysis of activation functions in U-Net for binary water segmentation using Sentinel-2 imagery. In Proceedings of CoLInS-2025 (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 3983, Paper 11). <https://ceur-ws.org/Vol-3983/paper11.pdf>
18. Hnatushenko, V., Zhurba, A., Zimoglyad, A., & Ostrovska, K. (2025). Research on environmental changes based on fractal characteristics of satellite images. In Proceedings of MoDaST 2025 (CEUR Workshop Proceedings, Vol. 4005, pp. 62–71). <https://ceur-ws.org/Vol-4005/paper5.pdf>
19. Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., et al. (2022). ESA WorldCover 10m 2021 v200. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>
20. Alayrac, J. B., Donahue, J., Luc, P., et al. (2022). Flamingo: A visual language model for few-shot learning. Advances in Neural Information Processing Systems, 35, 23716–23736. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2204.14198>
21. Geirhos, R., Jacobsen, J. H., Michaelis, C., et al. (2020). Shortcut learning in deep neural networks. Nature Machine Intelligence, 2, 665–673. <https://doi.org/10.1038/s42256-020-00257-z>

Received 24.04.2026.  
Accepted 27.04.2026.  
Published 30.04.2026

***Prompt engineering for zero-shot land cover classification  
using multimodal language models on SENTINEL-2 imagery***

*Multimodal language models (VLMs) enable land cover classification from satellite imagery without labeled training data. This paper, extending previous work [8], analyzes prompt engineering approaches for land cover classification on Sentinel-2 imagery within the ESA WorldCover 2021 taxonomy. The color leakage phenomenon is identified and described, where the model bases its predictions on segmentation mask colors rather than image content. A four-invariant prompt protocol is proposed, including TCI-first ordering, grayscale mask conversion, elimination of color descriptions, and a fixed JSON output format, which removes this effect and increases the format compliance rate (FCR) from  $\approx 60\%$  to  $97\%$ . Two inference strategies are compared: Variant A (multi-cluster,  $mIoU \approx 7.1\%$ ) and Variant B (single-cluster,  $mIoU \approx 13.2\%$ ) on 10 Sentinel-2 tiles. In Variant B, each segment is*

processed independently using a binary mask, which simplifies spatial interpretation and reduces inter-segment interference. The highest result ( $mIoU = 46.2\%$ ) is achieved with the UNet-encoder + GPT-4.1 + Variant B configuration, although this corresponds to a single case.

*Problem Statement.* Land cover mapping from satellite imagery is widely used in ecological monitoring, urban planning, and agronomy. Traditional semantic segmentation approaches require large labeled datasets and significant computational resources, especially when adapting to new regions. Recent multimodal language models, including GPT-4.1, Claude 3.7 Sonnet, and Gemini 2.5 Pro, enable zero-shot classification without task-specific training. However, such pipelines introduce specific failure modes, notably the color leakage effect, where predictions depend on segmentation mask colors instead of actual image content.

*Recent Studies and Publications Analysis.* VLMs are increasingly used in remote sensing owing to their capacity for open-vocabulary reasoning over satellite imagery. Yao et al. introduced Falcon, a remote sensing vision-language foundation model; Mall et al. developed RSVLM for satellite image understanding; Li et al. presented RS-CLIP for zero-shot scene classification. Liu et al. proposed RSHBench — a detailed benchmark for diagnosing hallucinations in multimodal LLMs applied to remote sensing. For zero-shot learning, Saha et al. demonstrated improved classification by adapting VLMs with attribute descriptions; Barzilai et al. analysed recipes for improving VLM zero-shot accuracy in remote sensing. In prompt engineering, Wei et al. established chain-of-thought prompting and White et al. catalogued reusable prompt patterns. Geirhos et al. documented shortcut learning in deep networks, providing theoretical grounding for the color leakage phenomenon. Despite these advances, systematic analysis of prompt design for eliminating color artifacts in VLM-based land cover classification remains unstudied.

*Research Objective.* The objective of this study is to improve classification accuracy ( $mIoU$ ) and structured output correctness ( $FCR$ ) in zero-shot land cover classification on Sentinel-2 imagery by developing a prompt engineering protocol for multimodal language models that eliminates the color leakage effect and enforces a fixed structure of inputs and outputs.

*Main Body of Research.* A two-stage processing pipeline is used, combining unsupervised segmentation with VLM-based classification under a four-invariant protocol: TCI-first ordering, grayscale mask, no color descriptions, and structured JSON output. Variant A performs classification of all segments in a single request, while Variant B processes each segment independently using a binary mask. This change in formulation improves  $mIoU$  from 7.1% to 13.2%. Ablation analysis ( $n = 5$  tiles) shows that the JSON output constraint has the largest impact on  $FCR$ , while grayscale mask conversion most effectively reduces color leakage. Per-class analysis indicates that the improvement is primarily driven by the Cropland class (23.4%  $\rightarrow$  46.9%), whereas spectrally similar vegetation classes degrade.

*Conclusions. The study addresses the problem of improving classification accuracy (mIoU) and structured output correctness (FCR) in zero-shot land cover classification on Sentinel-2 satellite imagery through the development of a prompt engineering protocol for multimodal language models. The proposed protocol, consisting of four mandatory rules, eliminates the color leakage effect and increases FCR from  $\approx 60\%$  to  $97\%$ .*

*It is shown that the use of the single-cluster processing strategy (Variant B), in which each segment is processed independently using a binary mask, improves classification accuracy from  $7.1\%$  to  $13.2\%$  compared to the multi-cluster strategy (Variant A). This approach eliminates inter-segment context contamination, simplifies segment interpretation for the model, and improves structured output correctness, as each request produces a single JSON object. The highest result (mIoU =  $46.2\%$ ) is achieved with the UNet-encoder + GPT-4.1 + Variant B configuration; however, this corresponds to a single configuration and is not representative of overall performance across models and segmentation methods.*

*Keywords: prompt engineering, zero-shot classification, VLM, model, image, remote sensing, Sentinel-2.*

**Гончаров Олександр Геннадійович** – аспірант кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4349-4859>

**Удовик Ірина Михайлівна** – к.т.н., доцент, декан факультету інформаційних технологій Національний технічний університет "Дніпровська Політехніка.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5190-841X>

**Гнатушенко Вікторія Володимирівна** – д.т.н., професор, професор кафедри інформаційних технологій і систем Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5304-4144>

**Honcharov Oleksandr** – PhD Student, Department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technologies.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-4349-4859>

**Udovyk Iryna** – PhD of technical sciences, associate professor, head of the Faculty of Information Technology, Dnipro University of Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5190-841X>

**Hnatushenko Viktoriia** – doctor of engineering sciences, professor, professor of Department of Information Technologies and Systems, Ukrainian State University of Science and Technologies.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5304-4144>

А.Л. Скоромний

## ЗАКОНОМІРНОСТІ ФОРМУВАННЯ СУМАРНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ВИТРАТ РУКАВНИХ ФІЛЬТРІВ З ІМПУЛЬСНОЮ РЕГЕНЕРАЦІЄЮ НА СТАДІЯХ ВИГОТОВЛЕННЯ ТА ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Анотація.* В роботі розглянуто енергоспоживання протягом життєвого циклу будівництва та експлуатації фільтрів рукавних з імпульсною регенерацією (ФРІР) для очищення димових газів від пилу. Зібрані, узагальнені та проаналізовані експериментальні дані ФРІР, що розроблені та реалізовані компанією ДП «УкрНТЦ «Енергосталь» на підприємствах гірничо-металургійного комплексу України протягом останніх 30 років. Отримані залежності площі фільтрації, маси та витрати стисненого повітря від продуктивності фільтрів дозволили визначити реальне енергоспоживання, в тому числі енерговитрати на виготовлення металу і будівництво корпусу та механічного обладнання фільтрів, енерговитрати на створення фільтрувальних рукавів, витрати електроенергії на роботу вентилятора для транспортування димових газів через фільтр та витрати електроенергії на роботу компресора для компримування повітря, що використовується в системі регенерації.

Встановлено, що енергетичні витрати на експлуатацію протягом одного року є співмірними з енерговитратами на виробництво фільтраційної установки. Обидві величини демонструють близькі значення в абсолютних показниках, а також дуже подібний характер залежностей. Така відповідність дозволяє по-новому поглянути на структуру енергетичного навантаження фільтраційних систем упродовж життєвого циклу, а також виділити ті параметри, які мають суттєвий вплив на сумарну енергоємність.

*Ключові слова:* енергоємність, рукавні фільтри з імпульсною регенерацією, енерговитрати на будівництво, енерговитрати на експлуатацію, сумарні енерговитрати.

**Постановка проблеми.** Сучасні системи уловлення димових газів промислових установок і очищення цих газів від твердих суспендованих частинок пилу є невід'ємною частиною промислових процесів виробництва в гірничо-металургійному комплексі, цементній промисловості, підприємствах енергетичного сектору, систем аспірації тощо. При проектуванні таких систем основна увага інженерів лежить в області підвищення ефективності уловлення пилогазових викидів та забезпечення достатньої ефективності очищення для досягнення кінцевої запиленості димових газів після очистки на рівні сучасних екологічних нормативів (5-20 мг/м<sup>3</sup> в залежності від токсичності пилу).

При цьому питання енергоспоживання є похідною відносно конструкції газоочисних установок і розглядається переважно в контексті наявних та доступних на промислових підприємствах електричних потужностей та інших енергоносіїв в достатній кількості та якості, які необхідні для забезпечення надійної та стабільної роботи систем газоуловлювання та газоочистки. Це є актуальним і для фільтрів рукавних з імпульсною регенерацією (ФРІР), які є одним з найбільш перспективних типів газоочисного устаткування, частка якого постійно збільшується. Відсутність систематизованого підходу до оцінки енергоемності газоочисних систем на основі ФРІР протягом усього життєвого циклу обмежує можливості для їхнього впровадження в стратегії сталого розвитку та декарбонізації промисловості.

Таким чином існує проблема комплексного дослідження енергетичних витрат на створення та експлуатацію систем очистки газів від пилу на базі ФРІР, що дозволить інтегрувати дані про конструкцію, експлуатацію та життєвий цикл у загальний екологічно-енергетичний баланс.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведений огляд науково-технічної інформації показав, що основна увага дослідників та інженерів, які займаються удосконаленням систем газоочистки на базі рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією, спрямований на:

- оптимізації конструктивних параметрів – зміни геометричних розмірів фільтрувальних рукавів (їх довжини, діаметру, форми та їх взаємного розташування всередині корпусу фільтра) [1] [2–5];
- покращенні конструкції системи регенерації – зміни форми імпульсних сопел, їх розташування відносно входу у фільтрувальні рукави, куту подачі стисненого повітря, тощо [6];
- покращенні систем управління системами регенерації – подача імпульсів по досягненні порогових значень перепаду тиску в камерах чистого та забрудненого газу [7, 8];
- покращенні розподілу очищеного газу всередині фільтру – використання розподільників потоку та інших технічних рішень, спрямованих на зменшення гідравлічного опору фільтрів [9, 10];
- вибору марки сталі для виготовлення корпусу рукавного фільтру [11, 12];
- розроблення методів економічної оптимізації проектування рукавних фільтрів [11–13], в тому числі моделями мінімізації сумарних річних витрат на роботу рукавних фільтрів (Total Annual Cost, TAC);

Водночас варто підкреслити, що більшість робіт зосереджується на оптимізації експлуатаційної діяльності фільтрів, але не зачіпають питання, пов'язані з попереднім етапом – зокрема, з технологіями виробництва корпусів та конструктивними особливостями, які також суттєво впливають на енергоефективність. Подібних досліджень, які комплексно аналізують вплив саме конструктивних рішень і технологій виготовлення фільтрів на їхню подальшу експлуатацію, наразі дуже мало. Це підкреслює важливість

подальших робіт, що можуть доповнити подібні економічні моделі аналізом повного життєвого циклу та конструктивних характеристик рукавних фільтрів.

**Мета дослідження.** Метою даної роботи є дослідження факторів, що впливають на енергоємність виробництва та експлуатації рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією для пошуку шляхів зменшення сумарних витрат енергії протягом життєвого циклу створення та експлуатації газоочистного устаткування.

**Викладення основного матеріалу дослідження.**

Одним із ключових факторів, що впливають на загальну енергоємність систем уловлювання й очищення газів, є маса металоконструкцій фільтра рукавного з імпульсною регенерацією (ФРІР), яка безпосередньо визначає матеріалоємність, габарити, витрати на транспортування та обслуговування, а також обсяг спожитої енергії на виготовлення та монтаж обладнання. Враховуючи це, оптимізація конструктивних параметрів ФРІР з метою зменшення його маси та площі фільтрації без втрати ефективності є актуальним напрямом підвищення ресурсної ефективності та зменшення вуглецевого сліду промислових підприємств.

У межах дослідження проаналізовано технічні характеристики 55 моделей фільтрів рукавних з імпульсною регенерацією, виготовлених і побудованих компанією ДП «УкрНТЦ «Енергосталь» на підприємствах гірничо-металургійного комплексу України за останні 30 років. Ці фільтри охоплюють широкий діапазон продуктивностей – від 3,2 до 2723,0 тис. м<sup>3</sup>/год. Апроксимація експериментальних даних здійснювалась методом найменших квадратів. Для порівняльного аналізу було залучено вибірккові дані щодо фільтрів закордонного виробництва:

- AM Industrial Group, LLC;
- C&W DustTech;
- Controlled Air Design;
- DMC;
- Donaldson Company, Inc.;
- Sternvent;
- U.S. Air Filtration, Inc.

На Рис. 1 представлено графік залежності площі фільтрації від продуктивності рукавного фільтра, який демонструє майже лінійну кореляцію. Така поведінка відповідає теоретичному очікуванню за умови фіксованого значення питомого фільтраційного навантаження. Лінія тренду побудована за даними фільтрів виробництва ДП «УкрНТЦ «Енергосталь». Експериментальні дані фільтрів імпортного виробництва підтверджують виявлений тренд в частині фільтрів продуктивності до 400 тис. м<sup>3</sup>/год.

Як видно з Рис. 1, площа фільтрації з коефіцієнтом достовірності апроксимації експериментальних даних, який наближається до одиниці, визначається залежністю:

$$F = 10,867 \cdot Q \quad (1)$$

де:

F – площа фільтрації, м<sup>2</sup>;

Q – продуктивність фільтру по очищуваному газу, 1000 м<sup>3</sup>/год.

На Рис. 2 представлені дані, які свідчать про те, що маса фільтрів ДП «УкрНТЦ «Енергосталь» має ступеневу сублінійну залежність від продуктивності фільтрів по очищуваному газу і ця маса фільтру визначається формулою:

$$M_{\phi} = 0,796 \cdot Q^{0,92} \quad (2)$$

де:

$M_{\phi}$  – маса фільтру, т.

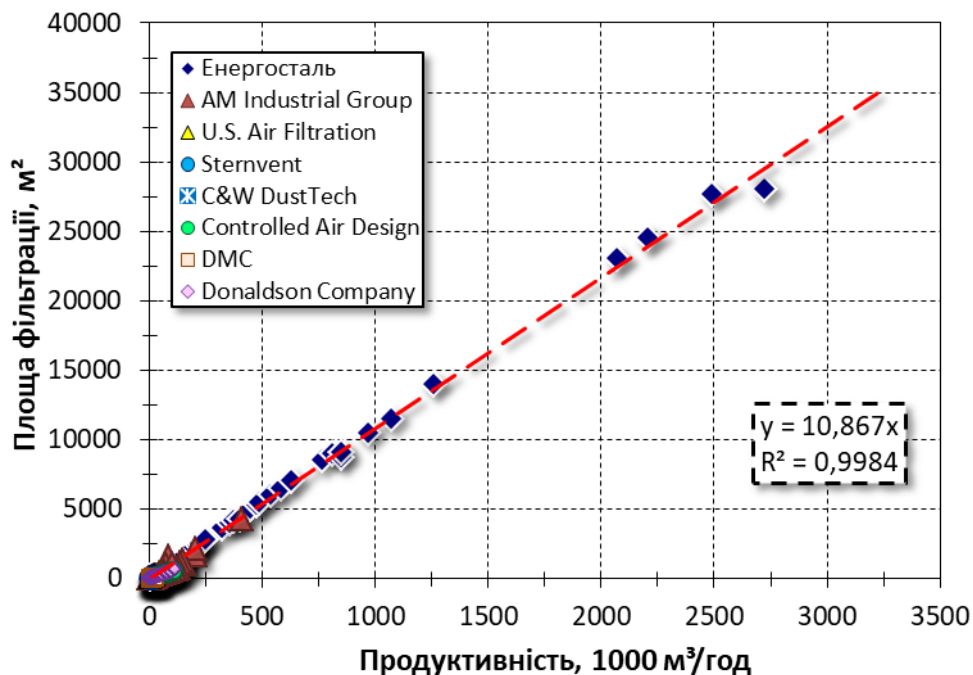


Рисунок 1 – Залежність площі фільтрації від продуктивності рукавного фільтра

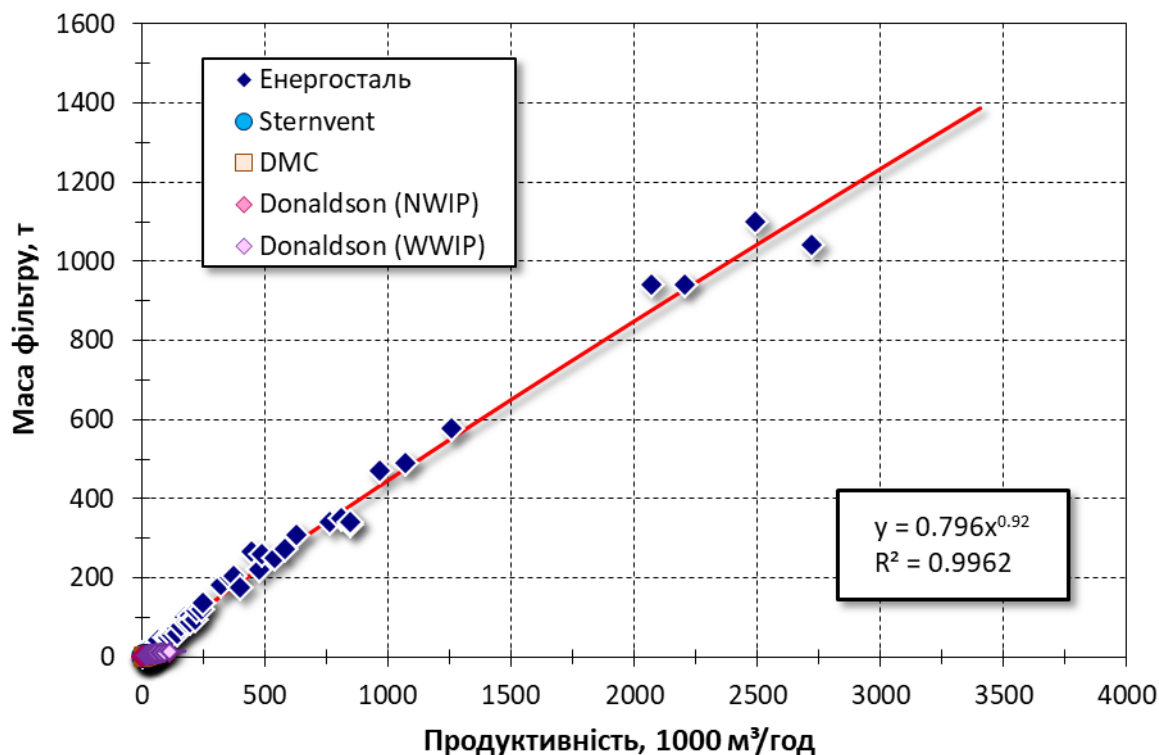


Рисунок 2 – Залежність маси металоконструкцій від продуктивності фільтра

Різні типи технологічних операцій оброблення металу (наприклад, свердління та розкрій лазером) суттєво відрізняються за питомими енергетичними витратами [14], що на пряму впливає на величину вуглецевого сліду виробництва. Це означає, що використання однакових матеріалів не гарантує однакової енергоємності – вона змінюється в залежності від способу їх оброблення, обладнання та організації виробничого процесу.

Фільтрувальні рукави можуть виготовлятися з різних видів волокон – як синтетичних (поліефір, поліпропілен, фторопласт, поліамід), так і неорганічних (скловолокно, базальтове волокно), із використанням тканих або нетканих структур. Тип волокна, спосіб плетіння та наявність додаткових покриттів (мембран, термостійких просочень тощо) безпосередньо впливають на механічну міцність, термостійкість, хімічну стійкість і фільтраційну здатність рукава. Ці параметри визначають рекомендовану температуру експлуатації, ефективність очищення та, що особливо важливо для екологічного аналізу, – середній строк служби елемента до заміни.

Для збереження узагальненого характеру оцінки та забезпечення її застосовності до ширшого кола об'єктів у межах дослідження було впроваджено низку спрощень:

- По-перше, передбачається, що всі металеві компоненти корпусу, опорних конструкцій і внутрішніх елементів фільтра виготовляються із вуглецевої сталі, без урахування технологічної обробки конкретних деталей.

- По-друге, вважається, що всі фільтрувальні рукави виготовлені з поліефірного (ПЕ) матеріалу первинного походження. У межах спрощеної методики фільтрувальний матеріал прийнято як однорідний поліефірний нетканий текстиль із питомою масою 500 г/м<sup>2</sup>.

- По-третє, для врахування енергетичних витрат на оброблення, складання та інші етапи виробництва встановлено фіксований коефіцієнт корекції, що дорівнює 30 % додаткових енерговитрат до питомої енергоємності відповідних базових матеріалів – сталі для корпусу та полімерного полотна для фільтрувальних елементів.

Ці спрощення не відображають індивідуальну картину для кожного виробника, але дозволяють забезпечити сталу методологічну основу для оцінки енергетичних характеристик фільтраційних установок у різних масштабах, що є критично важливим при сценарному аналізі та прогнозуванні впливу на довкілля.

З урахуванням прийнятих спрощень вхідні дані для оцінки енерговитрат на виробництво основних елементів фільтраційної системи наведено в табл.1. Питома енергоємність виробництва вуглецевої сталі прийнята на рівні 41,02 МДж/кг, а для первинної пластмаси, яка слугує сировиною для виробництва фільтрувальних рукавів, – 112,2 МДж/кг [15]. Для обох матеріалів застосовано поправку +30 % на обробку, складання та допоміжні технології, внаслідок чого узагальнені питомі витрати становлять відповідно 53,33 МДж/кг для сталі та 145,86 МДж/кг для синтетичного волокна. Поверхнева щільність фільтрувального матеріалу прийнята рівною 0,5 кг/м<sup>2</sup>, що відповідає типовим параметрам поліефірних рукавів середньої щільності.

Після виробництва фільтраційної установки ключовим етапом життєвого циклу стає експлуатація, яка супроводжується безперервним споживанням енергії. Для рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією основними джерелами енергетичних витрат є:

- робота вентилятора, який забезпечує рух забрудненого газу через фільтрувальні рукава;
- робота компресора, що створює імпульси стисненого повітря для очищення рукавів.

Таблиця 1

Вхідні дані для оцінки енерговитрат на виробництво елементів фільтра

Параметр	Базове значення	Корекція на виробництво	Узагальнене значення
Питома енергоємність виробництва прокатної сталі, $SE_{ст}$ , МДж/кг	41,02	+30 %	53,33
Питома енергоємність виробництва первинного полімеру, $SE_{ПЕ}$ , МДж/кг	112,2	+30 %	145,86
Поверхнева щільність фільтрувального матеріалу, $\rho_{ПЕ}$ , кг/м <sup>2</sup>	0,50	–	–

Ці два компоненти формують експлуатаційну енергоємність системи, яку необхідно враховувати при аналізі повного енергетичного навантаження.

Робота вентилятора забезпечує подолання гідравлічного опору системи фільтрації та транспортування очищеного газу до димаря або наступних технологічних ланок. Кількість спожитої енергії визначається виразом:

$$E_{вент} = \frac{\Delta P_{\phi} \cdot Q \cdot t}{\eta_{вент}}, \quad (3)$$

де:

$E_{вент}$  – енергія, необхідна для роботи вентилятора, Дж;

$\Delta P_{\phi}$  – сумарний гідравлічний опір фільтра, Па;

$Q$  – об'ємна продуктивність установки, м<sup>3</sup>/с;

$t$  – тривалість експлуатації, с;

$\eta_{вент}$  – ККД вентилятора (у межах 65–75 %).

Значення  $\Delta P$  оцінюється з урахуванням розрахункового опору фільтрувального матеріалу, залишкового шару пилу та опору корпусу. Таким чином, величина  $E_{вент}$  пов'язана з конструкцією фільтра опосередковано, через втрати тиску та геометрію.

Імпульсна регенерація фільтрувальних рукавів виконується шляхом періодичної подачі стисненого повітря, яке створює зворотну деформаційну хвилю і сприяє відриву шару пилу. Енергія, необхідна для компримування повітря, залежить як від кількості циклів, так і від надлишкового тиску у ресивері.

Процес стиснення повітря в компресорі описується політропним законом:

$$p \cdot V^k = \text{const}, \quad (4)$$

де:

$k$  – показник політропи, який для сухого повітря при наближенні до адіабатичного стискання становить, приблизно, 1,33 [16];

$p$  – тиск, Па;

$V$  – об'єм повітря, м<sup>3</sup>.

Повна робота, необхідна для стискання одиниці об'єму газу від атмосферного тиску  $p_1$  до тиску в ресивері  $p_2$ , визначається з першого начала термодинаміки та інтегрується за виразом:

$$W = \frac{k}{k-1} \cdot p_1 \cdot V_1 \cdot \left[ \left( \frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \quad (5)$$

де:

$W$  – робота стиснення, Дж;

$p_1$  – атмосферний тиск, Па;

$p_2$  – тиск у ресивері, Па;

$V_1$  – об'єм повітря до стиснення, м<sup>3</sup>;

$k$  – показник політропи.

У практичному застосуванні доцільніше оперувати перепадом тиску  $\Delta P = p_2 - p_1$  та середньою витратою стисненого повітря  $q_{\text{пов}}$ , а також враховувати ККД компресора, у спрощеному вигляді для оцінки енергетичних витрат приймається така інженерна формула:

$$E_{\text{компр}} = \frac{\Delta P \cdot Q_a \cdot t}{k-1} \cdot \frac{1}{\eta_{\text{компр}}}, \quad (6)$$

де:

$E_{\text{компр}}$  – енергія, необхідна для роботи компресора, Дж;

$\Delta P$  – надлишковий тиск у ресивері, Па;

$Q_a$  – середня витрата стисненого повітря, м<sup>3</sup>/с;

$t$  – тривалість роботи, с;

$\eta_{\text{компр}}$  – ККД компресора (зазвичай 0,8–0,85).

Це спрощення засноване на припущенні ідеальної газової поведінки повітря та політропного режиму стиснення. Воно широко використовується для інженерного оцінювання енерговитрат у компресійних установках, зокрема при розрахунку систем імпульсної регенерації.

Слід зазначити, що середня витрата стисненого повітря  $Q_a$  не є сталою величиною – вона безпосередньо залежить від конструктивних параметрів фільтра, зокрема від площі фільтрації, довжини рукавів, частоти регенерації та обраної схеми очищення. В рамках цього дослідження побудовано узагальнені залежності питомих витрат повітря від продуктивності, що дозволяє кількісно оцінити значення  $q_{\text{пов}}$  без потреби у глибокому моделюванні режимів подачі. Ці результати представлені на Рис. 3.

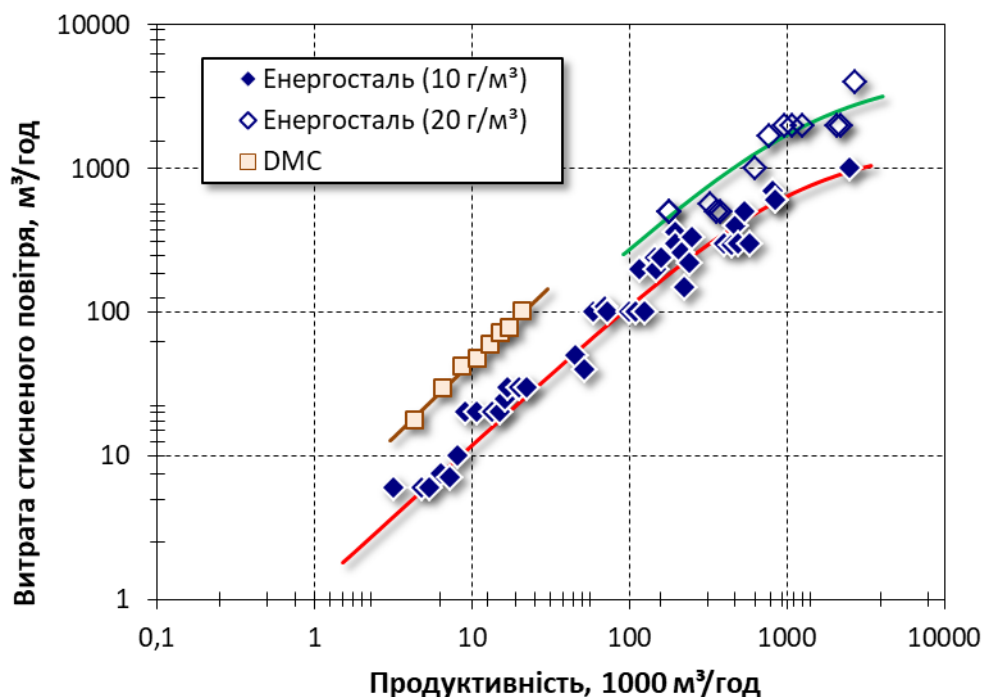


Рисунок 3 – Витрата стисненого повітря в залежності від продуктивності фільтра

На основі узагальнення та аналізу експериментальних даних виявлено закономірність витрат стисненого повітря: зі зростанням продуктивності питома витрата зменшується й добре описується функцією виду  $Y = A \cdot X / (X + B)$ :

$$\begin{cases} Q_a^* = 1445,45 \cdot \frac{1}{Q + 1194,145}; \text{ Запиленість до } 10 \text{ г/м}^3 \\ Q_a^* = 6337,48 \cdot \frac{1}{Q + 2832,152}; \text{ Запиленість до } 20 \text{ г/м}^3 \end{cases}, \quad (7)$$

де:

$Q_a^*$  – питома витрата стисненого повітря, м³/тис.м³, яка обчислюється за виразом:

$$Q_a^* = \frac{Q_a}{Q}, \quad (8)$$

де:

$Q_a$  – абсолютна витрата стисненого повітря, м³/год.

Загальна експлуатаційна енергоємність системи фільтрації визначається як сума обох компонентів:

$$E_{\text{експл}} = E_{\text{вент}} + E_{\text{комп}}, \quad (9)$$

Отримані залежності дозволяють оцінити вплив ключових параметрів – продуктивності, опору, ефективності обладнання – на експлуатаційні витрати енергії. Це, у свою чергу, дає змогу інтегрувати дані в загальну модель розрахунку життєвого енергетичного балансу фільтраційної системи.

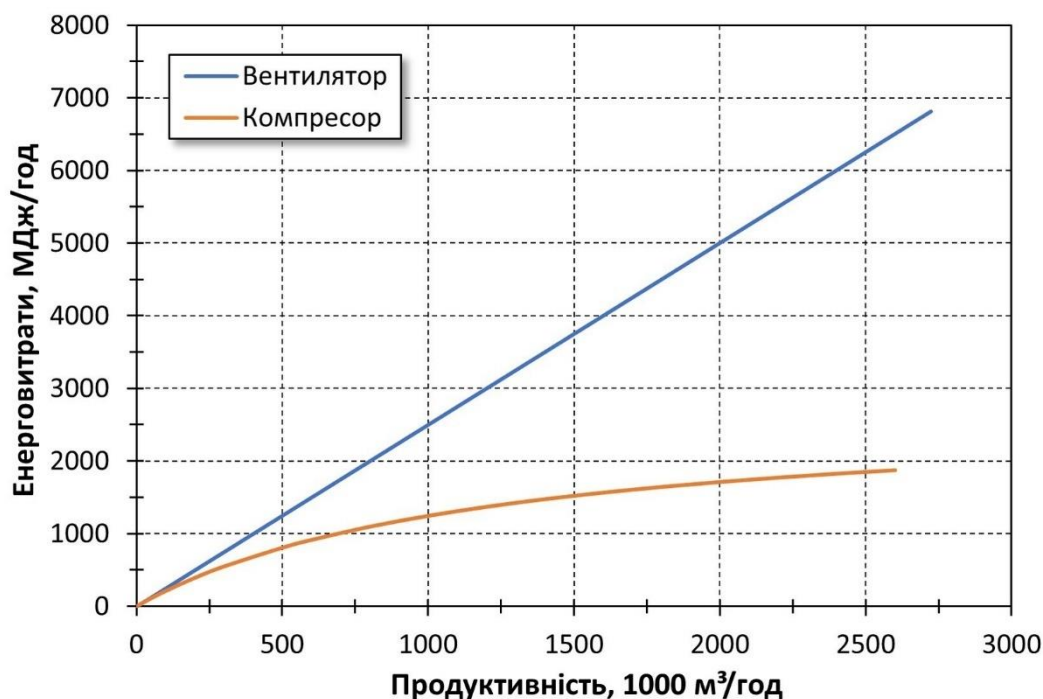


Рисунок 4 – Погодинні енерговитрати на роботу вентилятора та компресора стисненого повітря

Рис. 4 ілюструє питомі енерговитрати системи фільтрації в розрахунку на одну годину роботи, окремо для вентилятора, що забезпечує транспортування газу, та компресора, який створює імпульси стисненого повітря для регенерації фільтрувальних елементів. Обчислення проведено відповідно до формул (3) та (6).

З рисунка очевидно, що енергетичне навантаження, пов'язане з роботою вентилятора, суттєво перевищує витрати на компримування повітря. Така перевага зумовлена як значною продуктивністю основного газового потоку, так і сталим (лінійним) характером залежності втрат тиску від об'єму очищуваного газу.

Енерговитрати вентилятора зростають практично лінійно зі збільшенням продуктивності фільтра, що відповідає постійному гідравлічному опору та відносно стабільному ККД вентилятора. У той час витрати енергії на імпульсну регенерацію зростають за степеневим законом з показником меншим за одиницю, що відповідає характеру зміни витрат стисненого повітря.

На основі наведених вище формул і використовуючи технічні дані фільтраційних установок ДП «УкрНТЦ «Енергосталь», було виконано розрахунок експлуатаційної енергоемності для одного року безперервної роботи. Результати подано на Рис.5.

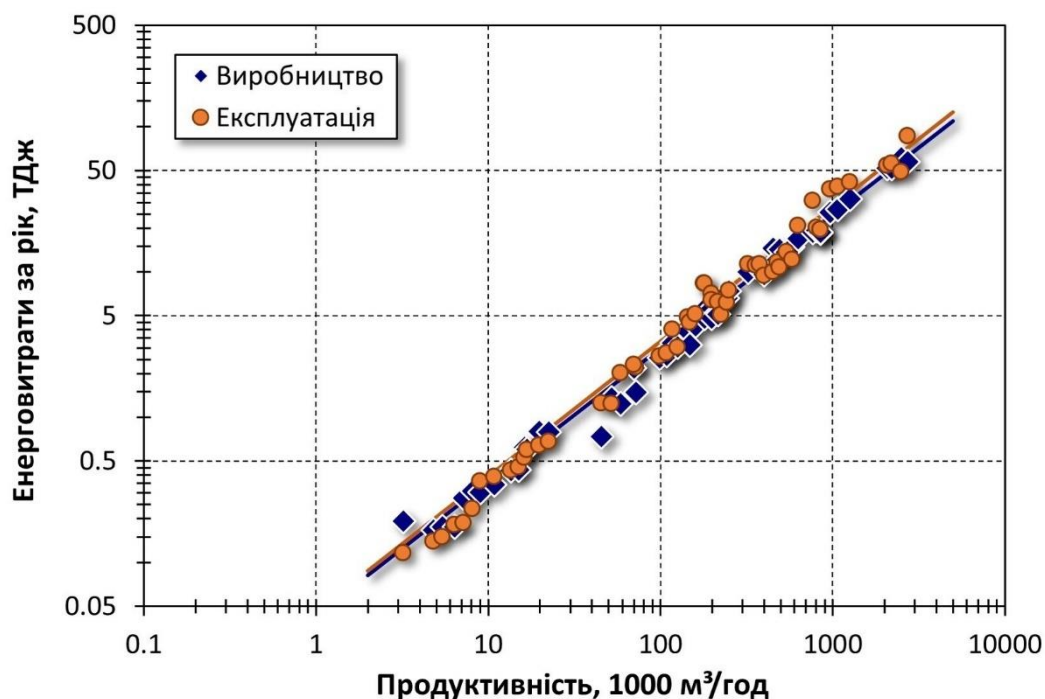


Рисунок 5 – Порівняння енерговитрат на виготовлення та річну експлуатацію фільтраційної установки

Один із ключових висновків, який випливає з аналізу рисунка, полягає в тому, що енергетичні витрати на експлуатацію протягом одного року є співмірними з енерговитратами на виробництво фільтраційної установки. Обидві величини демонструють близькі значення в абсолютних показниках, а також дуже подібний характер залежностей, що підтверджується збігом трендових кривих, наведених суцільними лініями. Така відповідність дозволяє по-новому поглянути на структуру енергетичного навантаження фільтраційних систем упродовж життєвого циклу, а також виділити ті параметри, які мають суттєвий вплив на сумарну.

Зокрема, вплив площі фільтрувального матеріалу є подвійним: з одного боку, більша площа збільшує масу текстильної частини й початкові енерговитрати на її виробництво. З іншого боку, збільшення площі тканини знижує частоту необхідної регенерації, зменшуючи навантаження на систему стиснення повітря та подовжуючи строк служби рукавів. Більша площа тканини забезпечує більш рівномірний розподіл навантаження на фільтр, а отже, менше пилоутворення на одиницю поверхні, що позитивно впливає на довговічність матеріалу.

З огляду на те, що ресурс фільтрувальних елементів зазвичай перевищує один рік, зменшується частота їх заміни, а разом із нею – і середньорічні питомі витрати енергії на виробництво. У довгостроковій перспективі це дозволяє розглядати більшу площу тканини як енергетично вигідне рішення, навіть попри початкове зростання витрат на її виробництво.

**Висновки.** Таким чином, на основі узагальнення та аналізу експериментальних даних щодо конструктивних, масогабаритних та експлуатаційних параметрів виявлені закономірності впливу продуктивності на площу фільтрувальної поверхні і масу металу

для виготовлення рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією, а також на витрати стисненого повітря для роботи системи регенерації для очистки газів від пилу в широкому діапазоні продуктивності газоочисних установок 3,0-2700 тис. м<sup>3</sup>/год.

Ці залежності дозволили визначити енерговитрати на створення та експлуатацію ФРП, в тому числі енерговитрати на виготовлення металу і будівництво корпусу та механічного обладнання фільтрів, енерговитрати на створення фільтрувальних рукавів, витрати електроенергії на роботу вентилятора для транспортування димових газів через фільтр та витрати електроенергії на роботу компресора для компримування повітря, що використовується в системі регенерації.

Встановлено, що енергетичні витрати на експлуатацію протягом одного року є співмірними з енерговитратами на виробництво фільтраційної установки. Обидві величини демонструють близькі значення в абсолютних показниках, а також дуже подібний характер залежностей, що підтверджується збігом трендових кривих, наведених суцільними лініями. Така відповідність дозволяє по-новому поглянути на структуру енергетичного навантаження фільтраційних систем упродовж життєвого циклу, а також виділити ті параметри, які мають суттєвий вплив на сумарну енергоемність.

#### ЛІТЕРАТУРА / REFERENCES

1. J.-U. Kim, J. Hwang, H.-J. Choi, M.-H. Lee, Effective filtration area of a pleated filter bag in a pulse-jet bag house, *Powder Technol.* 311 (2017), pp. 522–527. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.02.013>.
2. J.R. Gabites, J. Abrahamson, J.A. Winchester, Design of baghouses for fines collection in milk powder plants, *Powder Technol.* 187 (2008), pp. 46–52. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.01.012>.
3. M.L. Croom, *Filter dust collectors: design and application*, McGraw-Hill, New York, NY, USA, 1995, 253 P.
4. F. Löffler, H. Dietrich, W. Flatt, eds., *Dust collection with bag filters and envelope filters*, Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 1988, 274 P. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-07900-2>.
5. [intensiv-filter.com/en/impressum/](https://www.intensiv-filter.com/en/impressum/), (n.d.). <https://www.intensiv-filter.com/en/impressum/> (accessed June 3, 2025).
6. Z. Yu, Y. Muraoka, K. Furumoto, T. Fukasawa, T. Ishigami, J. Liu, K. Fukui, A novel pulse-jet cleaning method to effectively extend the lifetime of pleated filter and reduce dust emission, *Adv. Powder Technol.* 35 (2024), pp. 104456. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2024.104456>.
7. N. Çankaya, M. Özcan, Performance optimization and improvement of dust laden air by dynamic control method for jet pulsed filters, *Adv. Powder Technol.* 30 (2019), pp. 1366–1377. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2019.04.014>.
8. A.V. Kuzmin, V.A. Pinchuk, S. Khudoliy, D.A. Garcia Arango, C.A. Echeverri Gutiérrez, M.S. Echeverri Gutiérrez, Feasibility of proportional–integral–derivative control for high-inertia heating systems: Energy use and dynamic response, *Appl. Therm. Eng.* (2025), pp. 126784. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126784>.

9. F. Zhang, Y. Ding, Z.-X. Low, L. Jia, G. Zhou, Y. Liu, Z. Zhong, W. Xing, Effects of flow distributor structures and particle-wall interaction on baghouse gas-solid flow, *Sep. Purif. Technol.* 335 (2024), pp. 126140. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.126140>.
10. C.-J. Tsai, M.-L. Tsai, H.-C. Lu, Effect of filtration velocity and filtration pressure drop on the bag-cleaning performance of a pulse-jet baghouse, *Sep. Sci. Technol.* 35 (2000), pp. 211–226. <https://doi.org/10.1081/ss-100100152>.
11. A.L. Skoromnii, *Metodyka vibora ratsyonalnoho materyala korpusa rukavnoho fyltra s ympulsnoi reheneratsyei*, v: *Resursosberezhnye Y Enerhoeffektyvnost Ynzhenernoi Ynfrastrukturi Urbanyzyrovannikh Terrytoryi Y Promishlennikh Predpriyatiy Materyali II Mezhdunarodnoi Nauchno-Tekhnicheskoi Ynternet-Konferentsyy*, KhNUHKh ym. A. N. Beketova, Kharkov, 2016: ss. 11–15.
12. A.L. Skoromnii, Ynhultsov S.V., *Kryteryi dlia vibora materyala korpusa rukav-noho fyltra typu FRYR*, v: *Sbornyk Trudov V Mezhdunarodnoi Nauchno-Praktycheskoi Konferentsyy Molodikh Uchenikh Y Spetsyalystov «Ynnovatsyonnie Puty Modernyzatsyy Bazovikh Otrasley Promishlennosti Enerho- Y Resursosberezhnye Okhrana Okruzhaiushchei Pryrodnoi Sredi»*, HP «UkrNTTs «Enerhostal», Kharkov, 2016: ss. 77–80.
- A.C. Caputo, P.M. Pelagagge, Baghouse system design based on economic optimization, *Environ. Prog.* 19 (2000), pp. 238–245. <https://doi.org/10.1002/ep.670190410>.
13. H. Marczak, Energy inputs on the production of plastic products, *J. Ecol. Eng.* 23 (2022), pp. 146–156. <https://doi.org/10.12911/22998993/151815>.
14. S. Dutta, A. Mukhopadhyay, A.K. Choudhary, C.C. Reddy, Power consumption analysis of pulse jet filtration system assisted with pre-charger using polyester conductive media, *J. Inst. Eng. India Ser. E.* 102 (2021), pp. 17–23. <https://doi.org/10.1007/s40034-020-00179-w>.
15. P. Stavropoulos, V.C. Panagiotopoulou, Carbon footprint of manufacturing processes: conventional vs. non-conventional, *Processes.* 10 (2022), pp. 1858. <https://doi.org/10.3390/pr10091858>.

Received 24.04.2026.

Accepted 27.04.2026.

Published 30.04.2026

***Regularities of formation of total energy expenditures of pulse-jet bag filters  
at the stages of manufacturing and operation***

*Abstract. The paper examines energy consumption throughout the lifecycle of construction and operation of pulse-jet regenerated bag filters (PJBF) for flue gas dedusting. Experimental data from PJBF developed and implemented by SE 'UkrSTC "Energostal" at Ukrainian mining-metallurgical enterprises over the past 30 years were collected, generalized, and analyzed. Obtained dependencies of filtration area, mass, and compressed air consumption on filter productivity enabled determination of actual energy consumption, including energy expenditures for metal production and construction of filter housing and mechanical equipment, energy for filter bags, electricity for fan operation to transport flue gases through the filter, and electricity for compressor operation for air compression in the regeneration system.*

*It was established that annual operational energy expenditures are comparable to energy costs for filter unit production. Both values show similar absolute figures and dependency*

*patterns. This equivalence offers a new perspective on the energy load structure of filtration systems over their lifecycle and highlights parameters significantly affecting total energy intensity.*

*Keywords: energy intensity, pulse-jet bag filters, construction energy expenditures, operational energy expenditures, total energy expenditures.*

**Скоромний Андрій Леонідович** – к.т.н., старший науковий співробітник кафедри теплового інжинірингу та енергетичних технологій Національного технічного університету «Дніпровська політехніка».

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7093-9070>

**Skoromnyi Andrii Leonidovich** - PhD, senior researcher of Department of Thermal Engineering And Energy Technology of the Dnipro University of Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7093-9070>

**СУЧАСНІ ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОПРАЦЮВАННЯ ТА ПОШУКУ  
ОЦИФРОВАНИХ ДОКУМЕНТІВ У НАВЧАННІ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ  
В 13 «БІБЛІОТЕЧНА, ІНФОРМАЦІЙНА ТА АРХІВНА СПРАВА»**

*Анотація. Розглядаються процеси оцифрування документної спадщини та створення електронних колекцій у бібліотечних і архівних установах. Особливу увагу приділено класифікації документів, що підлягають оцифруванню, зокрема унікальним матеріалам, архівним і бібліотечним фондам, рукописам, документам підвищеного попиту та матеріалам, представленим в обмеженій кількості. Оцифрування таких документів вважається ефективним підходом до збереження оригіналів із одночасним забезпеченням ширшого доступу до інформаційних ресурсів. Описано технологічні етапи створення цифрових копій, зокрема сканування, технічне опрацювання зображень, контроль якості та зберігання цифрових файлів. Окремий акцент зроблено на створенні страхових копій, призначених для довготривалого зберігання, а також користувацьких електронних версій, орієнтованих на публічний доступ.*

*Також проаналізовано роль інформаційних систем в управлінні оцифрованими матеріалами. Цифрові ресурси описуються та обліковуються за допомогою спеціалізованих баз даних і стандартів метаданих, що забезпечують упорядкування, ідентифікацію та пошук електронних документів. Використання інтегрованих платформ дає змогу фахівцям координувати процеси оцифрування, опису, зберігання та поширення цифрових матеріалів у межах єдиного технологічного середовища.*

*Особливу увагу приділено організації цифрових колекцій та впровадженню пошукових інструментів, які забезпечують швидке знаходження релевантних документів в електронних бібліотеках і архівах. Крім того, підкреслено важливість інтеграції технологій оцифрування в освітній процес підготовки здобувачів спеціальності В 13 «Бібліотечна, інформаційна та архівна справа». Вивчення принципів створення та управління цифровими колекціями формує у майбутніх фахівців компетентності, необхідні для роботи з електронними ресурсами, організації цифрових архівів і забезпечення довготривалого збереження документної спадщини. Реалізація таких підходів сприяє розширенню доступу до культурної та наукової інформації, а також посиленню ролі цифрових технологій у розвитку сучасної інформаційної інфраструктури.*

*Ключові слова: сучасні інформаційні технології, документ, колекція документів, пошукова система, документознавство, цифровізація, цифрові колекції документів, пошук оцифрованих документів.*

**Вступ.** Сучасне суспільство функціонує в умовах стрімкого розвитку інформаційно-телекомунікаційних технологій, що суттєво трансформують способи створення, зберігання та використання інформації. У такій реальності використання електронних документів фактично стає невід'ємною складовою повсякденної діяльності. Організації різних типів – підприємства, установи, державні органи та інші інституції – щоденно працюють із цифровими документами, що дедалі активніше замінюють традиційні паперові носії.

Студенти спеціальності В13 «Бібліотечна, інформаційна та архівна справа» вивчають процеси оцифрування документів як ключовий елемент сучасного документознавства. Під час навчання вони ознайомлюються із класифікацією документів, що підлягають цифровому відтворенню, вчать створювати електронні копії та впорядковувати цифрові колекції, опановують стандарти зберігання та опису матеріалів, а також набувають практичних навичок у роботі з інформаційними системами та електронними бібліотеками. Такий підхід дозволяє майбутнім фахівцям ефективно управляти електронними ресурсами, забезпечувати їхню доступність і довготривале збереження.

Метою роботи є довести, що проекти, пов'язані з оцифруванням інформаційних ресурсів зараз спрямовані на розв'язання комплексу надважливих завдань. Передусім їх реалізація передбачає забезпечення відкритого доступу до електронних копій рідкісних і цінних документів. Водночас важливою метою виступає збереження оригіналів, оскільки створення цифрових копій дає змогу значно зменшити фізичне використання першоджерел. Крім того, подібні ініціативи покликані підтримувати та розвивати різноманітні програми й проекти, діяльність яких пов'язана з процесами оцифрування інформації. Не менш суттєвим завданням є формування єдиного інформаційного середовища, що забезпечує централізований доступ до цифрових матеріалів, створених і збережених у різних установах.

**Аналіз існуючих досліджень.** Раніше в сфері оцифрування документів було здійснено низку розвідок та практичних проектів, що заклали основу сучасних підходів до роботи з електронними копіями та цифровими колекціями. Зокрема, вивчались методики створення страхової документації, стандарти метаданих для бібліотечних і архівних фондів, а також технології інтеграції електронних матеріалів у цифрові архіви. Ці напруження дозволили систематизувати процеси оцифрування та забезпечили основу для впровадження у навчальний процес спеціальності В 13. Як найбільш показові наведемо джерела, відзначаючи, що повної мірою вони не вирішили це питання.

Зокрема у статті О. Башун [1] розглядаються основні проекти оцифрування бібліотечних колекцій у США, зокрема акцентується увага на організаційних моделях та джерелах фінансування таких ініціатив. Автор підкреслює значення партнерства між бібліотеками та технологічними компаніями для ефективної реалізації цифрових проектів.

О. Волохін [2] аналізує застосування стандарту метаданих Dublin Core для каталогізації інтернет-ресурсів, визначаючи його як універсальний інструмент опису елект-

ронних документів. У роботі обґрунтовується важливість уніфікації метаданих для забезпечення ефективного пошуку та інтеграції ресурсів у цифровому середовищі.

С.Г. Клочок [3] досліджує процес формування систем метаданих для цифрових історико-культурних ресурсів бібліотек. Автор акцентує увагу на необхідності адаптації міжнародних стандартів до національних інформаційних систем та специфіки бібліотечних фондів.

І.В. Лобузін [4] розкриває технологічні та управлінські аспекти оцифрування історико-культурної спадщини, зокрема етапи створення цифрових копій і організацію їх зберігання. У статті підкреслюється важливість комплексного підходу до цифровізації, що поєднує технічні рішення та ефективне управління ресурсами.

К.В. Лобузін та О.П. Бодак [5] розглядають питання створення страхового фонду цифрових копій унікальних документів у Національній бібліотеці України імені В. І. Вернадського. Автори наголошують на значенні довготривалого збереження цифрових ресурсів та розробці відповідних технологічних і організаційних рішень.

Також у монографії К.В. Лобузін [6] висвітлено теоретичні та практичні засади організації знанневих ресурсів у бібліотечно-інформаційній діяльності. Авторка детально аналізує сучасні підходи до структуризації, опису та управління інформаційними ресурсами в умовах цифрового середовища.

Отже, проаналізовані – дуже показові – джерела висвітлюють ключові аспекти оцифрування документної спадщини, зокрема технологічні процеси, створення метаданих та організацію цифрових ресурсів у бібліотечно-інформаційній сфері. Водночас у наукових працях недостатньо розкрито питання інтеграції новітніх цифрових технологій (наприклад, штучного інтелекту) у процеси управління електронними колекціями та автоматизації опису документів. Перспективним напрямом подальших досліджень залишається також розроблення ефективних моделей довготривалого збереження цифрових ресурсів і забезпечення їхньої стійкої доступності в умовах швидких технологічних змін.

**Інформаційно-пошукові технології роботи з оцифрованими колекціями документів у підготовці фахівців спеціальності В13.** Серед сучасних інформаційних технологій важливе місце посідають системи електронного архівування. Використання електронного архіву дає можливість забезпечити надійність збереження інформаційних ресурсів, гарантувати їх довготривале зберігання, а також підтримувати необхідний рівень конфіденційності даних. Водночас такі системи відкривають можливість віддаленого доступу до документів, що дозволяє працювати з ними незалежно від місця перебування користувача. Додатковою перевагою є можливість одночасного використання тих самих документів кількома користувачами.

Важливим практичним результатом упровадження електронних архівів є також оптимізація використання матеріальних ресурсів, адже зменшується потреба у значних площах для зберігання паперових архівів. Розвиток електронно-інформаційних технологій закономірно супроводжується зростанням обсягів цифрових даних. У зв'язку з цим упровадження й подальше вдосконалення електронних архівних систем дозволяє

значно підвищити ефективність пошуку документів, забезпечити оперативний доступ до них, а також гарантувати їх надійне збереження протягом тривалого часу.

Процес формування життєвого циклу оцифрованих інформаційних ресурсів передбачає реалізацію кількох послідовних етапів (рис. 1).

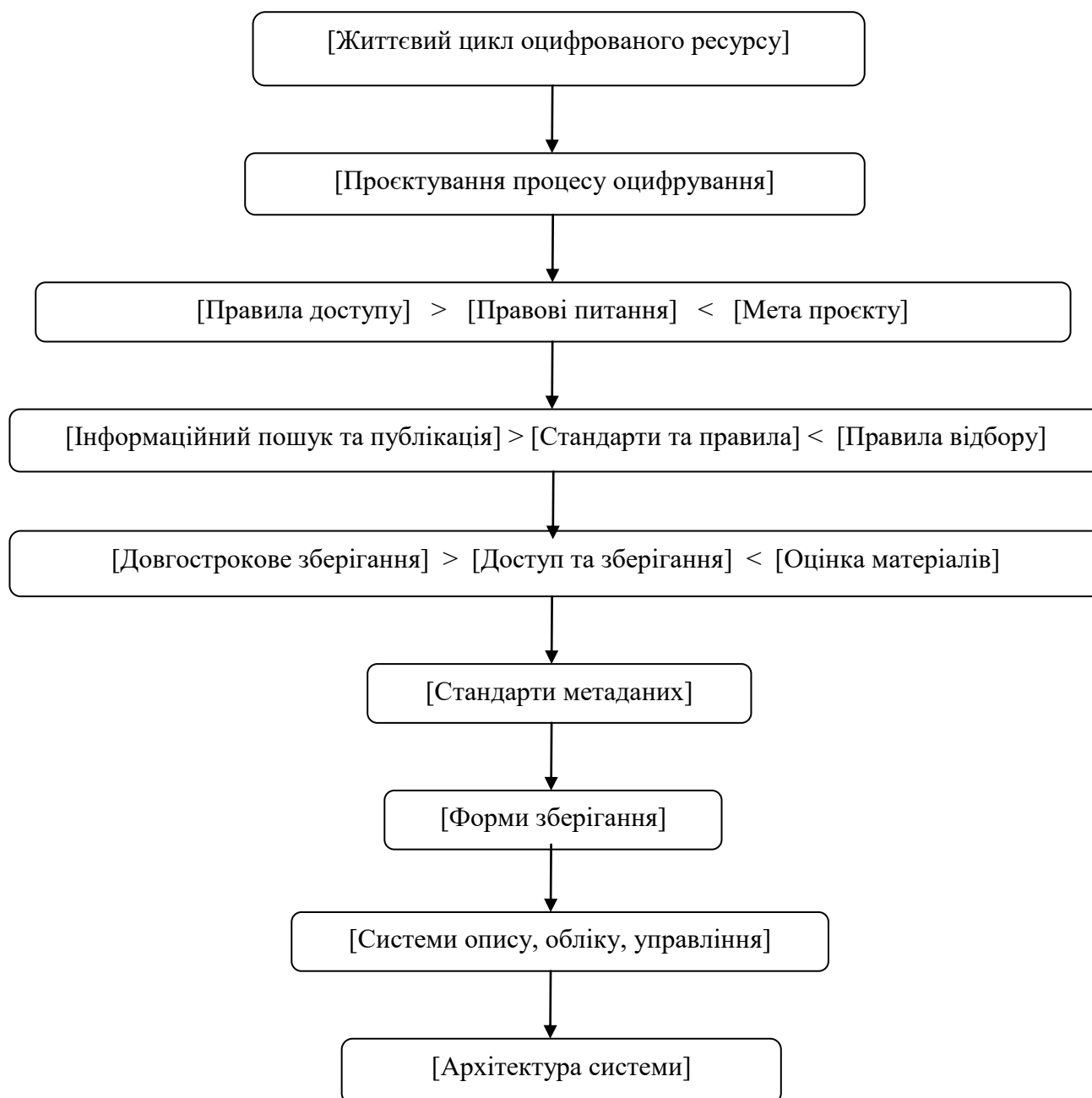


Рисунок 1 – Життєвий цикл оцифрованого ресурсу

Першим етапом виступає проектування процесу оцифрування архівних документів. На цьому етапі передусім визначається основна мета відповідного проєкту. Нею може бути організація дистанційного доступу до цифрових копій документів, забезпечення довготривалого зберігання електронних версій оригіналів, відтворення історичних матеріалів або ж підтримка процесу безперервної освіти. Важливим складником

цього етапу є також формування чітких критеріїв відбору документів, які доцільно включати до цифрової колекції.

Як правило, відбір здійснюється серед матеріалів, що мають особливу цінність: рідкісних, стародавніх або таких, що збереглися в обмеженій кількості примірників. Паралельно проводиться оцінювання фізичного стану наявних матеріалів і визначення їхньої придатності для створення цифрових копій. Крім того, необхідно визначити технічні та організаційні ресурси, потрібні для реалізації процесу оцифрування, зокрема відповідне обладнання, програмне забезпечення та фахівців, які забезпечуватимуть створення й опис цифрових інформаційних ресурсів.

Другий етап стосується юридичних аспектів роботи з оцифрованими матеріалами. Йдеться насамперед про визначення правил й умов доступу до цифрових ресурсів, що мають відповідати вимогам чинного законодавства та нормам авторського права, стандартів та правил управління, а саме:

- визначення стандартів, відповідно до яких здійснюється формування та використання метаданих для цифрових інформаційних ресурсів. Для бібліотечних фондів ключову роль відіграють формати MARC і DC, тоді як у сфері архівної інформації застосовуються стандарти ISAD(G), EAD, а також MARC-AMC;

- уніфікація форматів, що використовуються для збереження графічних файлів, зокрема встановлення єдиних технічних вимог до таких форматів, як JPG і TIFF;

- створення та впровадження систем, призначених для описування, обліку й подальшого управління цифровими колекціями;

- опрацювання загальної архітектури інформаційної системи, а також визначення способів інтеграції різнорідних ресурсів із метою їх об'єднання в межах єдиного електронного сховища;

- зберігання оцифрованих даних та доступ до них;

- упровадження спеціалізованих пошукових інструментів, а також забезпечення публікації та представлення оцифрованих матеріалів у відкритому інформаційному середовищі;

- організація надійного довготривалого зберігання цифрових ресурсів, що передбачає запобігання фізичному зношуванню носіїв інформації, підтримку актуальності форматів електронних документів, а також перенесення метаданих до більш сучасних інформаційних систем;

- дотримання вимог як міжнародних, так і національних стандартів, що регламентують роботу з цифровими ресурсами;

- здійснення постійної опіки над оцифрованими матеріалами, під якою розуміється комплекс процесів, що реалізуються протягом усього життєвого циклу документів і спрямовані на забезпечення їх збереження.

Послідовність операцій, необхідних для повноцінного функціонування електронних ресурсів, передбачає виконання таких дій:

- здійснення відбору документів, які підлягають оцифруванню, а також організація системи метаданих, призначених для їх опису;

- надання користувачам відкритого доступу до створених цифрових ресурсів;
- проведення перевірки оцифрованих матеріалів із подальшим відбором тих із них, що мають зберігатися протягом тривалого часу;
- вилучення документів, які не відповідають встановленим критеріям відбору для подальшого відновлення та збереження, а також передавання відібраної інформації до спеціалізованих сховищ;
- забезпечення якісного збереження цифрових даних, що передбачає перевірку коректності метаданих і контроль цілісності створених цифрових копій;
- повернення матеріалів, які не пройшли перевірку, на етап повторного опрацювання та додаткового відбору;
- фіксація інформації відповідно до визначених стандартів і технічних вимог;
- організація дистанційного доступу користувачів до цифрових даних;
- здійснення конвертації оцифрованих ресурсів у різні формати, а також формування нових інформаційних колекцій на основі вже наявних даних.

Керування життєвим циклом оцифрованих документів може бути представлено у вигляді відповідної схеми (рис. 2).



Рисунок 2 – Основні елементи життєвого циклу оцифрованого ресурсу

Усі ці операції є фундаментом організації цифрового ресурсу та створення цифрових колекцій.

Реалізацію усіх етапів оцифровування можна подати як технологічну схему, яка базується на певних підсистемах (рис. 3).

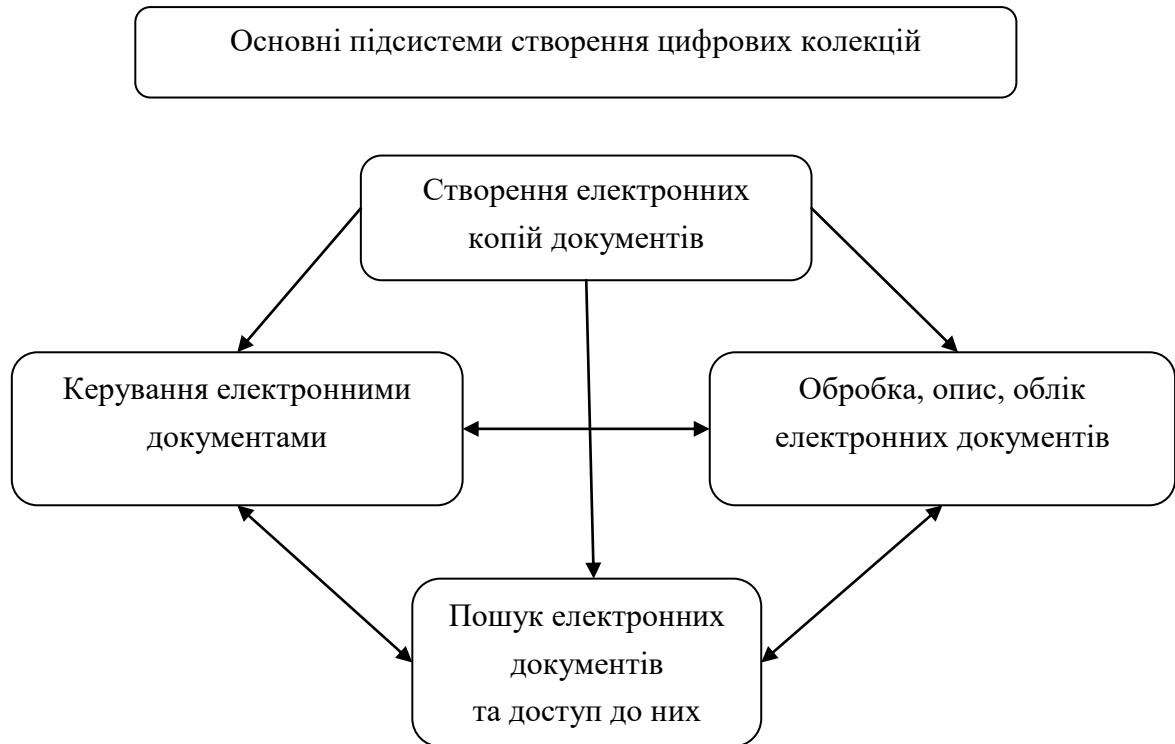


Рисунок 3 – Підсистеми комплексу робіт з оцифрування

Підсистема створення електронних копій організована як комплекс із двох взаємопов'язаних блоків. До їх складу входять технічні засоби та програмні інструменти, призначені для сканування документів та подальшої обробки отриманих даних, а також мережеве обладнання, що забезпечує передачу інформації. На початковому етапі роботи здійснюється добір відповідного сканувального обладнання, орієнтованого на роботу з різними типами документів. Після цього відбувається безпосередній процес оцифрування матеріалів. Отримані цифрові файли проходять технічне опрацювання, а сформовані зображення передаються за допомогою захищеного мережевого протоколу оператору, який здійснює контроль якості та перевіряє відповідність створених копій установленим вимогам.

Підсистема опису й обліку електронних ресурсів функціонує на базі програмної платформи «ІРБІС-64». Саме на її основі була створена спеціалізована база даних «SCAN», призначена для організації та координації робіт, пов'язаних із формуванням цифрової колекції. Використання цієї платформи для реалізації інформаційної системи електронної бібліотеки пояснюється тим, що значна частина матеріалів, які становлять основу її наповнення, уже має сформовані метадані опису, створені відповідно до бібліотечних стандартів. Така обставина суттєво полегшує роботу оператора: метадані для оцифрованих документів можуть формуватися шляхом експорту вже наявних бібліографічних записів у формат UNIMARC. У випадку потреби до процесу опису цифрових матеріалів може бути залучений кваліфікований каталогізатор. У результаті всі фахівці, які беруть участь у роботі з електронними ресурсами, працюють у межах єдиного про-

грамного середовища, що забезпечує їхню ефективну взаємодію. Система підтримує вимоги як міжнародних, так і національних стандартів і водночас пропонує широкий спектр інструментів, які дозволяють змінювати структуру інформаційних масивів, модифікувати формати представлення даних, а також створювати додаткові модулі й програмні додатки.

Програмна платформа ІРБІС представлена двома основними версіями, що використовуються для автоматизації бібліотечної діяльності: ІРБІС-32 та ІРБІС-64. Основною відмінністю між ними є принцип побудови внутрішньої архітектури. Версія ІРБІС-32 реалізована за моделлю файл-серверної системи й орієнтована переважно на потреби малих і середніх бібліотек. Натомість ІРБІС-64 функціонує за клієнт-серверною технологією, що робить її придатною для використання у середніх і великих бібліотечних установах. Новим напрямом розвитку цієї програмної родини стала система ІРБІС-64 для роботи з повнотекстовими базами даних.

Функціональні можливості платформи відповідають сучасним вимогам інформаційних технологій, оскільки вона підтримує міжнародні бібліографічні формати UNIMARC, MARC21 і RUSMARC. Крім того, система містить спеціальний web-модуль, що забезпечує доступ до баз даних через WWW-сервер, а також модуль Z, який дозволяє організувати взаємодію із зовнішніми інформаційними системами за протоколом Z39.50. Сукупність цих характеристик забезпечує можливість використання технологій запозичення вже готових бібліографічних описів.

Платформа підтримує реалізацію основних бібліотечних технологічних процесів, серед яких – пошук інформації, комплектування фондів, видача документів, їх систематизація, адміністрування системи та каталогізація ресурсів. Для опису різних типів видань передбачено спеціальні екранні форми введення даних, що можуть використовуватися як для друкованих, так і для електронних документів. Окремо реалізовано інструменти, призначені для опису музейних предметів. Система також дозволяє створювати власні бази даних і словники, що забезпечують оперативний пошук інформації. Серед технологічних можливостей передбачено застосування штрих-кодів і радіочастотних міток на виданнях, що значно оптимізує процедуру видачі документів користувачам. Введення інформації може здійснюватися різними мовами, а інтерфейс системи є інтуїтивно зрозумілим і спрощує процес роботи з даними. Додатково реалізовано функцію автоматичної перевірки орфографії.

Система ІРБІС-64 забезпечує формування повнотекстових баз даних. Матеріали, що становлять інформаційне наповнення цих баз, можуть зберігатися у форматах TXT, DOC, RTF, PDF або HTML. Самі тексти розміщуються або у вигляді архівних файлів, або ж подаються у формі гіперпосилань. Робота системи базується на використанні трьох основних модулів:

- АРМ «Адміністратор», який поряд із базовими функціями забезпечує додаткові можливості для створення, налаштування та управління базами даних;
- АРМ кінцевого користувача, що призначений для здійснення пошуку та перегляду інформаційних ресурсів у мережевому середовищі;

– спеціальний шлюз, завдяки якому реалізується доступ до баз даних за технологією WWW.

Для користувачів системи передбачено два основні режими роботи. Перший із них передбачає здійснення пошуку за запитом, сформульованим природною мовою, із застосуванням оригінального механізму ранжування знайдених текстів. Другий режим орієнтований на виявлення текстів, подібних за змістом, у межах визначеного тематичного контексту.

У програмному середовищі ІРБІС-64 інтегровано два ключові технологічні рішення:

- можливість додавання графічних образів текстових документів, створених із використанням сучасних технологій цифрової обробки;
- застосування тематичних навігаційних інструментів, що полегшують пошук інформації.

Попри те що система автоматизації ІРБІС розроблялася насамперед для бібліотечних установ, її архітектура є відкритою. Саме тому вона може використовуватися і в інших організаціях, діяльність яких пов'язана з опрацюванням інформаційних ресурсів.

Електронний проєкт у цілому складається з двох основних складових – цифрової бібліотеки та страхового фонду (рис. 4). Функціональне призначення цифрової бібліотеки полягає у публікації матеріалів і забезпеченні доступу користувачів до них. Натомість страховий фонд виконує іншу функцію – довготривале зберігання архівних матеріалів. Саме відповідно до цієї структури було створено дві окремі бази даних.

Основним призначенням бази даних «SCAN» є опис цифрових об'єктів та ведення обліку робіт, пов'язаних із процесом створення електронних копій. У системі передбачено два типи запитів – «Замовлення» та «Страховий фонд». За допомогою форми «Замовлення» здійснюється контроль і відстеження процесу наповнення електронного фонду. Усі записи до бази даних формуються відповідно до стандарту PREMIS. Цей стандарт містить повний комплекс відомостей, необхідних для роботи з цифровими ресурсами: інформацію про формати та способи зберігання даних, опис операцій, що виконуються над оцифрованими матеріалами, дані про права доступу, а також історію зберігання цифрових об'єктів.

Для забезпечення довготривалого збереження оцифрованих матеріалів метадані повинні зберігатися окремо від самих файлів. У межах цього формату фіксуються всі основні атрибути цифрового об'єкта: відомості про процес оцифрування, технічні параметри обробки зображень, умови зберігання та способи доступу до інформації.

Існує п'ять основних категорій документів, які підлягають оцифруванню:

- 1) документи унікального характеру;
- 2) матеріали бібліотечних і архівних фондів;
- 3) стародруки та рукописні документи;
- 4) документи з високим попитом;
- 5) матеріали, представлені в обмеженій кількості.

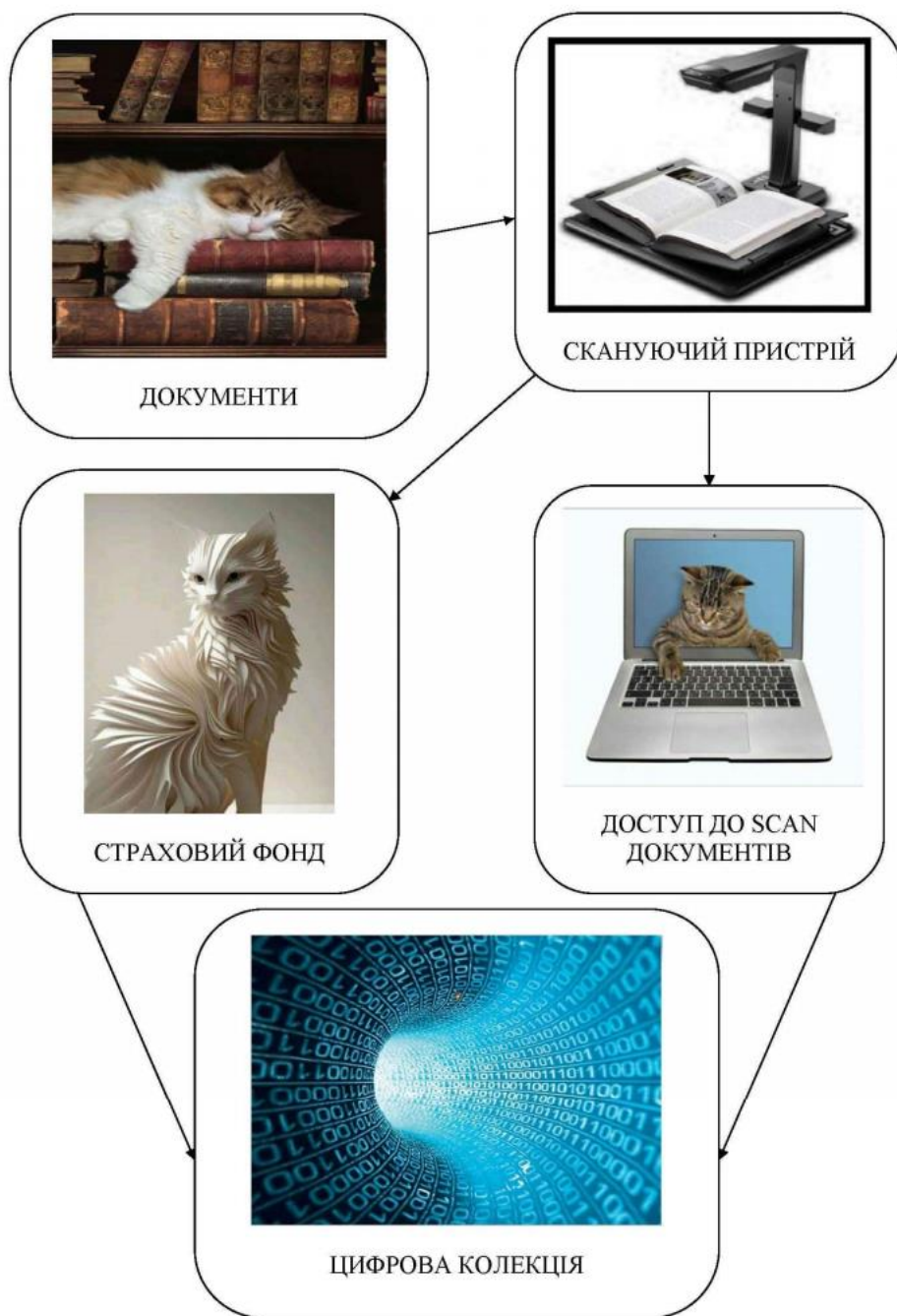


Рисунок 4 – Схема електронного проєкту

Оцифрування матеріалів перших трьох категорій дозволяє значно скоротити потребу у використанні оригіналів, що сприяє їх довготривалому збереженню. Для будь-яких цінних або унікальних документів створюються страхові копії, незалежно від віку та матеріалу виготовлення оригіналу. Конвертація документів четвертої категорії в електронний формат уповільнює процес їх зношування та зменшує необхідність частих реставрацій. Що стосується документів п'ятої категорії, представлених обмежено, їх оцифрування забезпечує можливість широкого розповсюдження та задоволення запитів користувачів.

Страхові копії виготовляють шляхом сканування або фотографування оригінальних матеріалів. Отримані цифрові зображення повинні відповідати високим стандартам якості, зберігатися у форматах JPG або TIFF та фіксуватися на оптичному диску UDO. Ці копії зберігаються в спеціально відведеному сховищі і використовуються лише у випадках втрати основного матеріалу. На диску UDO передбачено створення розділів із присвоєними номерами, де поступово розміщуються електронні копії, допоки диск не заповниться повністю.

У базі даних «SCAN» номер замовлення відображається в назвах папок і файлів, що значно полегшує подальший пошук інформації. Для довготривалого зберігання обрано диск UDO ємністю 60 ГБ. Оператор системи може контролювати процес наповнення диска, а за потреби зупиняти компонування, щойно буде досягнуто встановленого обсягу. Крім того, завжди доступні повні відомості про те, коли і яким чином конкретний матеріал було записано, а також дані про всі операції оцифрування.

Після завершення запису на UDO і перевірки якості цифрових копій оператор видаляє матеріали з жорсткого диска для звільнення простору під нові оцифровані файли. Далі процес наповнення наступних дисків повторюється, при цьому одночасно можуть наповнюватися кілька носіїв, залежно від окремих проєктів оцифрування.

Разом зі створенням страхових копій генеруються і електронні версії документів для їхнього оприлюднення. Ці версії формуються у форматах PDF та FliprBook. PDF використовується для вільного читання і роботи з будь-якими користувачами, тоді як FliprBook застосовується для матеріалів, що потребують захисту від копіювання. Створення книг у форматі FliprBook базується на PDF-файлах і передбачає захищений режим перегляду, можливість попереднього перегляду сторінок у повноекранному режимі, масштабування зображень та швидкий перехід до обраної сторінки. Після контрольної обробки PDF-файл передається до цифрового архіву для збереження.

Електронна версія документа розміщується в електронному архіві, а її повний опис із бази «SCAN» копіюється до бази цифрової бібліотеки. У базі з'являється позначка про публікацію матеріалу, що робить його доступним для всіх користувачів.

Головним завданням підсистеми пошуку й публікації є формування організованих цифрових колекцій. Електронна бібліотека виступає як своєрідний збірник документів, упорядкованих за певною тематикою. Кожна цифрова копія містить метадані, які автоматично асоціюють її з відповідною колекцією, і є доступною для перегляду користувачами. Документи в бібліотеці можуть групуватися за автором, тематикою чи типом документа. Кожен об'єкт має анотацію, а за допомогою гіперпосилань користувач може переглядати інформацію про цифрову колекцію та місце зберігання оригіналу.

Система підтримує комплексний пошук: наприклад, введення у полі пошуку фрази «м. Дніпро» автоматично видає всі відповідні оцифровані документи та книги, що тематично пов'язані з цим містом. Створення бібліотечної та архівної цифрової колекції на спільній платформі дозволяє залучати висококваліфікованих фахівців, що забезпечує точні та якісні описи електронних матеріалів, значно підвищуючи потенціал і цінність оцифрованих ресурсів.

**Висновки.** Вивчення процесів оцифрування та управління електронними документами є надзвичайно важливим для майбутніх фахівців В 13, оскільки цифрові колекції та електронні архіви стають невід'ємною частиною сучасної бібліотечної та архівної справи. Освоєння цих знань дозволяє забезпечити надійне збереження культурної та наукової інформації, підвищує ефективність доступу користувачів до матеріалів і формує компетентного спеціаліста, здатного організувати роботу з електронними ресурсами на професійному рівні.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Башун О. Проекти оцифрування бібліотечних колекцій у бібліотеках США. // Бібліотечний форум. № 3. 2011. С.40–41.
2. Волохін О. Каталогізація ресурсів Інтернету за допомогою Дублінського ядра метаданих. // Бібліотечний вісник. 2015. № 1. С. 3–7.  
URL: [https://nbuv.gov.ua/UJRN/bv\\_2015\\_1\\_3](https://nbuv.gov.ua/UJRN/bv_2015_1_3)
3. Клочок С. Г. Формування систем метаданих цифрових історико-культурних ресурсів бібліотек. // Бібліотечний вісник. 2015. № 3. С. 29–36.  
URL: [https://nbuv.gov.ua/UJRN/bv\\_2015\\_3\\_7](https://nbuv.gov.ua/UJRN/bv_2015_3_7)
4. Лобузін І. В. Оцифрування історико-культурної спадщини: технологія та управління // Реєстрація, зберігання і обробка даних. Т. 14. № 3. К., 2012. С. 104-114.  
URL: [https://nbuv.gov.ua/UJRN/rzod\\_2012\\_14\\_3\\_13](https://nbuv.gov.ua/UJRN/rzod_2012_14_3_13)
5. Лобузін К.В., Бодак О.П. Створення страхового фонду цифрових копій унікальних документів Національної бібліотеки України імені В.І. Вернадського. // Рукописна та книжкова спадщина України. Вип. 15. К., 2012. С. 246-256.  
URL: [https://nbuv.gov.ua/UJRN/rks\\_2012\\_15\\_18](https://nbuv.gov.ua/UJRN/rks_2012_15_18)
6. Лобузін К.В. Технології організації знаньєвих ресурсів у бібліотечно-інформаційній діяльності: моногр. / відп. ред. О. С. Онищенко; НАН України, нац. б-ка України ім. В. І. Вернадського. Київ, 2012. 249 с.  
URL: <https://irbis-nbuv.gov.ua/everlib/item/er-00021508>

#### REFERENCES

1. Bashun O. Proekty otsyfruvannia biblioteknykh kolektsii u bibliotekakh SShA [Projects of digitization of library collections in libraries of the USA]. // Library Forum [Bibliotechnyi forum]. 2011, no. 3, pp.40–41. (in Ukrainian).
2. Volokhin O. Katalohizatsiia resursiv Internetu za dopomohoiu Dublinskoho yadra metadanykh [Cataloging of Internet resources using the Dublin Metadata Core]. // Bibliotechnyi visnyk [Library Bulletin]. 2015, no. 1, pp. 3–7.  
URL: [https://nbuv.gov.ua/UJRN/bv\\_2015\\_1\\_3](https://nbuv.gov.ua/UJRN/bv_2015_1_3) (in Ukrainian).
3. Klochok S.H. Formuvannia system metadanykh tsyfrovyykh istoryko-kulturnykh resursiv bibliotek [Formation of metadata systems for digital historical and cultural resources of libraries]. // Bibliotechnyi visnyk [Library Bulletin]. 2015, no. 3, pp.29–36.  
URL: [https://nbuv.gov.ua/UJRN/bv\\_2015\\_3\\_7](https://nbuv.gov.ua/UJRN/bv_2015_3_7) (in Ukrainian).
4. Lobuzin I.V. Otsyfruvannia istoryko-kulturnoi spadshchyny: tekhnolohiia ta upravlinnia [Digitization of historical and cultural heritage: technology and management] // Reiestratsiia,

zberihannia i obrobka danykh [Registration, storage and processing of data]. 2012, vol. 14, no. 3, pp. 104–114. URL: [https://nbuv.gov.ua/UJRN/rzod\\_2012\\_14\\_3\\_13](https://nbuv.gov.ua/UJRN/rzod_2012_14_3_13) (in Ukrainian).

5. Lobuzina K.V., Bodak O.P. Stvorennia strakhovoho fondu tsyfrovyykh kopii unikalnykh dokumentiv Natsionalnoi biblioteky Ukrainy imeni V.I. Vernadskoho [Creation of an insurance fund of digital copies of unique documents of the National Library of Ukraine named after V.I. Vernadsky] // Rukopysna ta knyzhkova spadshchyna Ukrainy [Manuscript and book heritage of Ukraine]. 2012, vol.15, pp. 246-256.

URL: [https://nbuv.gov.ua/UJRN/rks\\_2012\\_15\\_18](https://nbuv.gov.ua/UJRN/rks_2012_15_18) (in Ukrainian).

6. Lobuzina K.V. Tekhnolohii orhanizatsii znannievykh resursiv u bibliotechno-informatsiini diialnosti [Technologies for organizing knowledge resources in library and information activities]. Kyiv, 2012, 249 p. URL: <https://irbis-nbuv.gov.ua/everlib/item/er-00021508> (in Ukrainian).

Received 24.04.2026.

Accepted 27.04.2026.

Published 30.04.2026

***Modern information technologies for processing and searching digitized documents  
in the education of students of the specialty B 13 "Library,  
information and archival affairs"***

*The article examines the processes of digitization of documentary heritage and the creation of electronic collections within library and archival institutions. Special attention is paid to the classification of documents subject to digitization, including unique materials, archival and library holdings, manuscripts, highly demanded documents, and materials available in limited quantities. Digitization of such documents is considered an effective approach to preserving original sources while simultaneously providing broader access to information resources. The study describes the technological stages of creating digital copies, including scanning, technical processing of images, quality control, and storage of digital files. Particular emphasis is placed on the creation of preservation copies intended for long-term storage as well as user-oriented electronic versions designed for public access. The article also analyzes the role of information systems in managing digitized materials. Digital resources are described and recorded using specialized databases and metadata standards, which ensure the organization, identification, and retrieval of electronic documents. The use of integrated platforms allows specialists to coordinate the processes of digitization, description, storage, and dissemination of digital materials within a unified technological environment. Special attention is given to the organization of digital collections and the implementation of search tools that enable users to quickly locate relevant documents within electronic libraries and archives. Furthermore, the article highlights the importance of integrating digitization technologies into the educational process for students specializing in Library, Information and Archival Studies (specialty B13). Studying the principles of creating and managing digital collections provides future professionals with the competencies necessary for working with electronic resources, organizing digital archives, and ensuring long-term preservation of documentary heritage. The implementation of such approaches contributes to improving access to cultural and scientific information and strengthens the role of digital technologies in the development of modern information infrastructure.*

*Keywords: modern information technologies, document, document collection, search system, document studies, digitalization, digital document collections, search for digitized documents.*

**Прокоф'сва Катерина Анатоліївна** – к.філол.н., доц., доцент кафедри документознавства та інформаційної діяльності, ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4242-3346>

**Решетілова Оксана Михайлівна** – к.пед.н., доцент кафедри документознавства та інформаційної діяльності, ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7975-0773>

**Савченко Сергій Володимирович** – к.іст.н., доц., доцент кафедри документознавства та інформаційної діяльності, ННІ «Дніпровський металургійний інститут» Українського державного університету науки і технологій.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3615-2343>

**Prokofieva Kateryna** – Cand. Sc. (Phil.), doc., assoc. prof. of the department of Business Documentation Management and Information Activity, ERI “Dnipro Metallurgical Institute” of the Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4242-3346>

**Reshetilova Oksana** – Cand. Sc. (Ped.), assoc. prof. of the department of Business Documentation Management and Information Activity, ERI “Dnipro Metallurgical Institute” of the Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7975-0773>

**Savchenko Sergiy** – Cand. Sc. (Hist.), doc., assoc. prof. of the department of Business Documentation Management and Information Activity, ERI “Dnipro Metallurgical Institute” of the Ukrainian State University of Science and Technology.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4242-3346>

## ЛОКАЛЬНА ПОДАЧА МОДИФІКУЮЧИХ КОМПОНЕНТІВ У ЗОНУ ВІБРАЦІЙНОГО УЩІЛЬНЕННЯ БЕТОННОЇ СУМІШІ

*Анотація.* У статті розглянуто систему локальної подачі цементного молочка або рідких модифікуючих компонентів безпосередньо в зону ущільнення бетонної суміші. Обґрунтовано доцільність поєднання глибинного вібраційного впливу з дозованим гідравлічним введенням активної рідкої фази, що дозволяє підвищити ефективність формування щільної та однорідної структури бетону. Запропоновано конструктивно-технологічну схему системи, до складу якої входять бак для приготування цементного молочка або модифікуючої рідини, електрична мішалка, насос, манометр, запобіжний клапан, дросель, кран, напірна магістраль і глибинний вібратор із насадкою для локального введення рідини. Розглянуто послідовність роботи системи, яка передбачає приготування однорідної суспензії, її подачу під тиском до глибинного вібратора та введення через жиклери безпосередньо в активну зону ущільнення бетонної суміші. Показано, що локальне введення цементного молочка або модифікуючих компонентів у вібраційно збуджену суміш сприяє кращому змочуванню заповнювача, зменшенню кількості порожнин і сухих включень, покращенню контакту цементного каменю із заповнювачем та підвищенню однорідності бетонної структури. Встановлено, що ефективність роботи системи залежить від узгодження параметрів тиску, витрати, діаметра жиклерів, тривалості подачі та режиму вібраційного ущільнення. Одержані результати можуть бути використані для вдосконалення технології ущільнення бетонних сумішей, особливо у виробках складної форми, густоармованих конструкціях, жорстких і малорухомих сумішах, а також для подальшого обґрунтування параметрів систем локального введення рідких модифікуючих компонентів.

*Ключові слова:* бетонна суміш, ущільнення, глибинний вібратор, цементне молочко, модифікуючі компоненти, локальна подача, жиклер, насос, вібраційний вплив, однорідність бетону, пористість, технологія бетонування.

**Постановка проблеми.** У процесі виготовлення бетонних і залізобетонних виробів якість ущільнення бетонної суміші значною мірою визначає щільність, однорідність, міцність і довговічність готової конструкції, однак традиційний вібраційний вплив не завжди забезпечує рівномірний розподіл цементного тіста та модифікуючих компонентів у зоні ущільнення. Особливо це проявляється у виробках зі складною геометрією, значною товщиною шару або за використання жорстких і малорухомих сумішей, де можуть формуватися порожнини, сухі включення, зони розшарування та недостатнього зчеплення між цементним каменем і заповнювачем. У зв'язку з цим актуаль-

ним є розроблення системи локальної подачі цементного молочка або рідких модифікуючих компонентів безпосередньо в зону дії глибинного вібратора, що дозволяє поєднати механічне ущільнення з цільовим регулюванням структури бетонної суміші.

**Аналіз останніх досліджень.** У сучасних дослідженнях технології бетонування значна увага приділяється підвищенню якості ущільнення бетонних сумішей, оскільки саме цей процес визначає щільність структури, міцність, довговічність і експлуатаційну надійність бетонних та залізобетонних виробів. У роботі [1] розглянуто вплив конструктивних і технологічних чинників на роботу бетонних елементів, що підтверджує важливість формування якісної структури бетону ще на етапі укладання та ущільнення суміші.

Безпосередньо процес ущільнення бетонної суміші під дією вібрації досліджено у праці [2], де показано, що ефективність консолідації бетону залежить від параметрів вібраційної дії, властивостей суміші та умов передавання коливань у її об'єм. Теоретичні основи роботи вібраційних машин будівельної індустрії, особливості формування коливальних режимів і взаємодії робочих органів із технологічним середовищем узагальнено в праці [3], що є важливою базою для розроблення обладнання з глибинним вібраційним впливом.

У роботі [4] запропоновано систему локальної подачі цементного молочка або модифікуючих компонентів безпосередньо в зону ущільнення бетонної суміші. Такий технічний підхід дає змогу поєднати глибинну вібраційну дію з дозованим введенням активної рідкої фази в найбільш інтенсивну зону переміщення частинок суміші. Це створює передумови для покращення змочування заповнювача, зменшення пористості, підвищення однорідності структури та зниження ризику утворення сухих або недостатньо ущільнених ділянок.

Окремий напрям досліджень пов'язаний із вивченням реологічної поведінки свіжого бетону під час вібраційного впливу. У роботі [5] запропоновано підхід до прогнозування радіуса дії глибинних вібраторів на основі поширення хвиль у бетонній суміші, що дає змогу оцінити ефективну зону ущільнення. У дослідженні [6] розглянуто реологічні властивості свіжого бетону у вібраційному стані та запропоновано модель, яка враховує зміну поведінки суміші під дією коливань. Це має важливе значення для вибору режимів локального введення цементного молочка або модифікуючих компонентів, оскільки ефективність їх розподілу залежить від в'язкості, рухливості та структурного стану суміші.

Узагальнення сучасних підходів до вібраційного ущільнення бетону наведено в огляді [7], де проаналізовано механізми ущільнення, основні фактори впливу та перспективні методи підвищення ефективності вібраційної технології. Особливу увагу в сучасних роботах приділено не лише механічному ущільненню, а й регулюванню властивостей бетонної суміші за допомогою добавок. Зокрема, у праці [8] досліджено вплив в'язкісно-модифікуючих добавок на повітряно-порову систему віброущільненого бетону, що підтверджує доцільність поєднання вібраційної дії з цільовим коригуванням складу суміші.

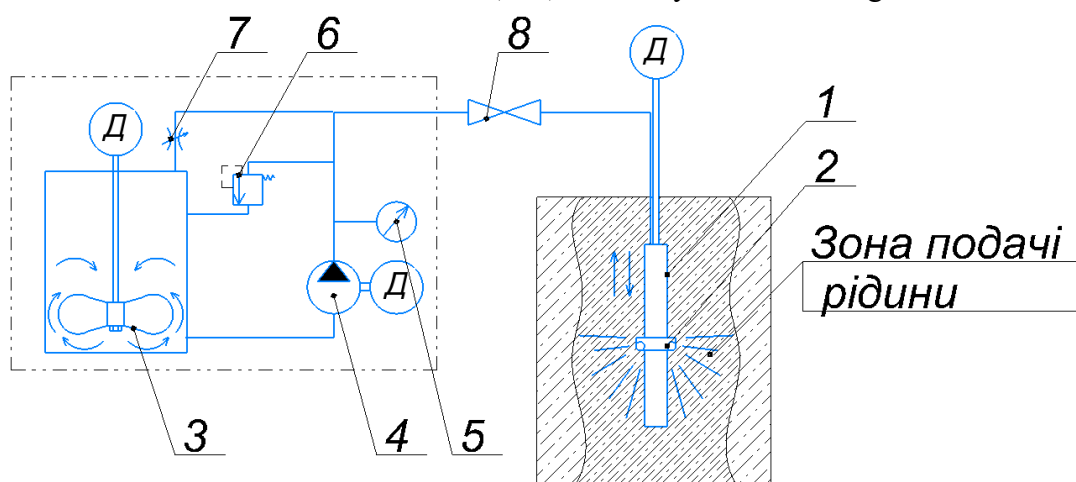
Перспективним напрямом є також використання систем контролю процесу ущільнення. У роботі [9] розроблено систему візуального моніторингу в реальному часі для оцінювання впливу вібрації на свіжий бетон, що дозволяє оперативно визначати характер розповсюдження вібраційної дії та стан ущільнення суміші. Такий підхід є важливим для подальшого розвитку автоматизованих систем, у яких подача модифікуючих компонентів може бути узгоджена з фактичним станом бетонної суміші в зоні ущільнення.

**Мета досліджень.** Метою досліджень є обґрунтування конструктивно-технологічного рішення системи локальної подачі цементного молочка або модифікуючих компонентів у зону ущільнення бетонної суміші, яка забезпечує сумісну дію глибинного вібратора та дозованого введення рідкої фази. Запропонований підхід спрямований на інтенсифікацію процесу ущільнення, рівномірний розподіл в'язучого і добавок у бетонній суміші, зменшення кількості пор та підвищення якості сформованої структури бетону.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Для підвищення ефективності ущільнення бетонних сумішей запропоновано систему локальної подачі цементного молочка або рідких модифікуючих компонентів безпосередньо в зону дії глибинного вібратора. Основна ідея такого рішення полягає в тому, що в процесі ущільнення бетонної суміші до неї додатково вводиться активна рідка фаза, яка подається не по всьому об'єму форми, а саме в зону найбільш інтенсивного вібраційного впливу. Це дозволяє поєднати механічне руйнування внутрішніх структурних зв'язків суміші з локальним покращенням змочування заповнювача, перерозподілом цементного тіста та зменшенням кількості пор.

У традиційних технологіях ущільнення основним чинником формування щільної структури бетону є вібраційна дія. Під впливом коливань зменшується внутрішнє тертя між частинками, бетонна суміш тимчасово переходить у більш рухомий стан, а повітряні включення витісняються з її об'єму. Однак ефективність цього процесу залежить від складу суміші, її водоцементного відношення, рухливості, крупності заповнювача, товщини шару, геометрії виробу та параметрів вібратора. У разі недостатньої кількості рідкої фази або нерівномірного її розподілу в суміші можуть виникати сухі включення, порожнини, локальні зони зниженої щільності та погіршене зчеплення цементного каменю із заповнювачем.

Запропонована система (рисунок 1) дає змогу усунути ці недоліки шляхом дозованого введення цементного молочка або модифікуючих компонентів безпосередньо в активну зону ущільнення. На відміну від попереднього додавання добавок у загальний об'єм суміші, локальна подача забезпечує надходження рідкої фази саме туди, де вібраційний вплив створює найкращі умови для її розподілу. У результаті підвищується ефективність використання добавок, зменшуються втрати матеріалу, покращується рівномірність ущільнення та знижується ризик розшарування бетонної суміші.



1 – глибокий вібратор, 2 – насадка, 3 – бак з електричною мішалкою,  
4 – насос, 5 – манометр, 6 – клапан запобіжний, 7 – дросель, 8 – кран.

Рисунок 1 – Принципова схема системи локальної подачі цементного молочка або модифікуючих компонентів в зону ущільнення бетонної суміші

Принципова схема системи містить кілька взаємопов'язаних функціональних вузлів: бак для приготування цементного молочка або рідкої модифікуючої композиції, електричну мішалку, насос, манометр, запобіжний клапан, дросель, кран, напірну магістраль і глибокий вібратор із насадкою для локального введення рідини. У бак подаються вода, цемент, а за необхідності — пластифікуючі, протиморозні, ущільнювальні або інші функціональні добавки. Електрична мішалка забезпечує перемішування компонентів до утворення однорідної суспензії, яка надалі подається насосом у напірну систему.

Наявність мішалки є важливою умовою стабільної роботи системи, оскільки цементне молочко є суспензією, частинки якої можуть осідати під дією сили тяжіння. Без постійного або періодичного перемішування можливе розшарування рідини, зміна її концентрації та нерівномірна подача в зону ущільнення. Тому бак із мішалкою виконує не лише функцію накопичення рідкого компонента, а й забезпечує підтримання його однорідності протягом усього технологічного циклу.

Після приготування цементного молочка насос подає його в напірну гідравлічну лінію. Манометр використовується для контролю робочого тиску, що дає змогу оператору або автоматизованій системі оцінювати стабільність подачі. Запобіжний клапан призначений для захисту системи від перевищення допустимого тиску. У разі засмічення жиклерів, перекриття крана або різкого зростання опору в магістралі клапан спрацьовує і запобігає пошкодженню насоса, трубопроводів та елементів глибокого вібратора.

Дросель забезпечує регулювання витрати рідини, що подається в зону ущільнення. Це дає змогу змінювати інтенсивність локального введення цементного молочка залежно від складу бетонної суміші, її рухливості, товщини шару, тривалості вібрування

та необхідного технологічного ефекту. Кран використовується для вмикання або припинення подачі, а також для можливого обслуговування системи.

Найважливішим елементом запропонованої системи є глибинний вібратор із насадкою, через яку рідкий компонент подається безпосередньо в бетонну суміш. Насадка може бути виконана з вбудованими жиклерами або каналами, розміщеними в зоні робочої булави. Під час занурення вібратора в бетонну суміш і запуску коливального режиму цементне молочко подається під тиском через жиклери в навколишній об'єм матеріалу. Оскільки в цій зоні частинки суміші перебувають у стані інтенсивного переміщення, рідка фаза швидше розподіляється між зернами заповнювача та заповнює порожнини.

Робота системи може бути подана як послідовність технологічних операцій. Спочатку в баку готується цементне молочко або модифікуюча рідина заданого складу. Потім глибинний вібратор занурюється в бетонну суміш на необхідну глибину. Після запуску вібраційного режиму вмикається насос, який подає рідину в насадку. Через жиклери рідина надходить у зону ущільнення, де під дією вібрації рівномірно розподіляється в локальному об'ємі суміші. Після завершення ущільнення подача припиняється, а вібратор переміщується в наступну робочу позицію.

Ефективність локальної подачі визначається узгодженням трьох основних процесів: приготування однорідної рідкої фази, її стабільного транспортування під заданим тиском і рівномірного введення в зону вібраційної дії. Якщо витрата рідини буде надто малою, технологічний ефект може бути недостатнім. Якщо ж витрата буде надмірною, виникає ризик локального збільшення водоцементного відношення, розшарування суміші або утворення зон із надлишком рідкої фази. Тому параметри подачі мають бути обґрунтовані з урахуванням властивостей бетонної суміші та режиму роботи вібратора.

Зміна діаметра жиклера або тиску в системі безпосередньо впливає на кількість рідини, що вводиться в бетонну суміш. Це дає змогу регулювати подачу відповідно до технологічних вимог. Для жорстких бетонних сумішей доцільно збільшувати інтенсивність локальної подачі, оскільки такі суміші мають більший внутрішній опір і потребують кращого змочування частинок. Для рухливих сумішей подача має бути обмеженою, щоб не допустити локального перезволоження і розшарування.

Особливістю запропонованої системи є те, що рідкий компонент вводиться в зону, де бетонна суміш перебуває у вібраційно збудженому стані. За таких умов знижується її ефективна в'язкість, підвищується рухливість частинок, полегшується проникнення цементного молочка між зернами заповнювача та прискорюється витіснення повітря. Це узгоджується з положеннями про зміну реологічної поведінки свіжого бетону під час вібраційного впливу [5, 6].

Застосування системи локальної подачі може бути особливо ефективним під час виготовлення виробів зі складною геометрією, густим армуванням або значною товщиною шару. У таких умовах звичайне вібрування не завжди забезпечує достатнє проникнення цементного тіста в усі локальні зони виробу. Дозоване введення цементного молочка безпосередньо в проблемну ділянку дозволяє підвищити щільність структури,

покращити контакт цементного каменю із заповнювачем і зменшити ризик утворення пустот.

Крім цементного молочка, система може використовуватися для введення рідких модифікуючих компонентів. До них можуть належати пластифікуючі добавки, прискорювачі або сповільнювачі тужавлення, протиморозні добавки, гідрофобізуючі або ущільнювальні компоненти. Це розширює технологічні можливості обладнання, оскільки дозволяє не лише ущільнювати бетонну суміш, а й локально змінювати її властивості залежно від умов формування виробу.

У разі роботи в умовах знижених температур особливого значення набуває можливість локального введення протиморозних добавок. Такий підхід дозволяє підвищити морозостійкість і технологічну надійність бетонування без надмірного збільшення кількості добавок у всьому об'ємі суміші. При цьому важливо забезпечити рівномірний розподіл добавки в зоні ущільнення, щоб уникнути концентраційних неоднорідностей, які можуть негативно вплинути на структуру бетону.

Система локальної подачі також може бути інтегрована з засобами контролю ущільнення. Зокрема, перспективним є використання візуального або сенсорного моніторингу стану бетонної суміші під час вібраційного впливу. У роботі [9] показано можливість застосування системи візуального моніторингу для оцінювання ефектів вібрації у свіжому бетоні. Поєднання такого контролю з локальною подачею рідких компонентів створює передумови для автоматичного регулювання тиску, витрати та тривалості введення залежно від фактичного стану суміші.

До основних переваг запропонованої системи можна віднести локальне введення активної рідкої фази саме в зону найбільш інтенсивного ущільнення; можливість регулювання тиску і витрати; підвищення рівномірності розподілу цементного тіста або добавок; зменшення кількості пор і сухих включень; покращення контакту між цементним каменем і заповнювачем; зниження витрат модифікуючих компонентів за рахунок їх цільового використання; можливість адаптації системи до різних складів бетонних сумішей.

Разом з тим ефективність роботи системи залежить від правильного вибору конструктивних і технологічних параметрів. Недостатній тиск може не забезпечити проникнення рідини в ущільнюваний об'єм, тоді як надмірний тиск може спричинити локальне розмивання структури суміші. Занадто малі отвори жиклерів можуть засмічуватися цементними частинками, а надто великі — створювати нерівномірне надходження рідини. Тому конструкція насадки має забезпечувати надійну роботу в умовах контакту з абразивним і в'язким середовищем.

Важливою умовою є синхронізація моменту подачі рідини з роботою глибинного вібратора. Найбільш доцільним є введення цементного молочка або модифікуючих компонентів після початку вібраційної дії, коли суміш уже перебуває у стані зниженої в'язкості та підвищеної рухливості. Завершення подачі доцільно виконувати до припинення вібрування, щоб залишкові коливання забезпечили остаточний розподіл рідкої фази в локальному об'ємі бетонної суміші.

**Висновки:** Обґрунтовано доцільність поєднання глибинного вібраційного ущільнення бетонної суміші з локальною подачею цементного молочка або модифікуючих компонентів безпосередньо в активну зону дії вібратора. Показано, що дозоване введення рідкої фази під час вібрування забезпечує кращий розподіл в'язучого, покращує контакт цементного каменю із заповнювачем, зменшує ймовірність утворення порожот і підвищує однорідність бетонної структури. Запропонована система може бути використана для підвищення якості ущільнення бетонних сумішей, особливо у виробках складної форми, густоармованих конструкціях і за умов застосування жорстких або малорухомих сумішей.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.011> Bending performance of dapped-end beams having web opening: Experimental and numerical investigation / С. Aksoylu та ін. *Structures*. 2023. Т. 48. С. 736–753. URL: <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.110>
2. Date, S., Goryozono, Y., & Hashimoto, S. (2012). Study on Consolidation of Concrete with Vibration. *Physics Procedia*, 25, 325–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.091>
3. Назаренко І. І. Вібраційні машини і процеси будівельної індустрії : навч. посіб. М.; Київ : КНУБА, 2007. 230 с.
4. Нестеренко М. М., Склярєнко Т. О., Бугрова Т. М., Гавріков В. В. Система локальної подачі цементного молочка або модифікуючих компонентів в зону ущільнення бетонної суміші. Створення, експлуатація і ремонт автомобільного транспорту та будівельної техніки : матеріали VIII Всеукр. наук.-техн. конф., м. Полтава, 24 квіт. 2025 р. Полтава : Нац. ун-т ім. Юрія Кондратюка, 2025. С. 38–40.
5. Banfill, P. F. G., Teixeira, M. A. O. M., & Craik, R. J. M. (2011). Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 932–941.
6. Li, Z., & Cao, G. (2019). Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state. *Cement and Concrete Research*, 120, 217–226. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.020>
7. Zhao, X., Huang, Y., Dong, W., Liu, J., & Ma, G. (2024). A review of compaction mechanisms, influencing factors, and advanced methods in concrete vibration technology. *Journal of Building Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110757>
8. Zhang, J., Gao, X., & Yu, L. (2020). Improvement of viscosity-modifying agents on air-void system of vibrated concrete. *Construction and Building Materials*, 239, 117843. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117843>
9. Tian, Z., Sun, X., Su, W., Li, D., Yang, B., Bian, C., & Wu, J. (2019). Development of real-time visual monitoring system for vibration effects on fresh concrete. *Automation in Construction*, 98, 61–71. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.025>

#### REFERENCES

1. Aksoylu, C., Özkılıç, Y. O., Çeledir, E., & Arslan, M. H. (2023). Bending performance of dapped-end beams having web opening: Experimental and numerical investigation. *Structures*, 48, 736–753. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.12.110>

2. Date, S., Goryozono, Y., & Hashimoto, S. (2012). Study on consolidation of concrete with vibration. *Physics Procedia*, 25, 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2012.03.091>
3. Nazarenko, I. I. (2007). *Vibratsiini mashyny i protsesy budivelnoi industrii: Navchalnyi posibnyk* [Vibration machines and processes of the construction industry: Textbook]. KNUBA.
4. Nesterenko, M. M., Skliarenko, T. O., Buhrova, T. M., & Havrikov, V. V. (2025). Systema lokalnoi podachi tsementnoho molochka abo modyfikuiuchykh komponentiv v zonu ushchilnennia betonnoi sumishi [System of local supply of cement slurry or modifying components to the compaction zone of concrete mixture]. In *Stvorennia, ekspluatatsiia i remont avtomobilnoho transportu ta budivelnoi tekhniki: Materialy VIII Vseukrainskoi naukovotekhnichnoi konferentsii* (Poltava, April 24, 2025) (pp. 38–40). National University “Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”.
5. Banfill, P. F. G., Teixeira, M. A. O. M., & Craik, R. J. M. (2011). Rheology and vibration of fresh concrete: Predicting the radius of action of poker vibrators from wave propagation. *Cement and Concrete Research*, 41(9), 932–941. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.04.011>
6. Li, Z., & Cao, G. (2019). Rheological behaviors and model of fresh concrete in vibrated state. *Cement and Concrete Research*, 120, 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.020>
7. Zhao, X., Huang, Y., Dong, W., Liu, J., & Ma, G. (2024). A review of compaction mechanisms, influencing factors, and advanced methods in concrete vibration technology. *Journal of Building Engineering*, 110757. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.110757>
8. Zhang, J., Gao, X., & Yu, L. (2020). Improvement of viscosity-modifying agents on air-void system of vibrated concrete. *Construction and Building Materials*, 239, 117843. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117843>
9. Tian, Z., Sun, X., Su, W., Li, D., Yang, B., Bian, C., & Wu, J. (2019). Development of real-time visual monitoring system for vibration effects on fresh concrete. *Automation in Construction*, 98, 61–71. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.11.025>

Received 22.04.2026.  
Accepted 27.04.2026.  
Published 30.04.2026

### ***Local supply of modifying components to the vibration compaction zone of a concrete mixture***

*The article considers a system for the local supply of cement slurry or liquid modifying components directly into the compaction zone of a concrete mixture. The feasibility of combining deep vibration action with dosed hydraulic introduction of an active liquid phase is substantiated, which makes it possible to improve the formation of a dense and homogeneous concrete structure. A structural and technological scheme of the system is proposed, which includes a tank for preparing cement slurry or modifying liquid, an electric mixer, a pump, a pressure gauge, a safety valve, a throttle valve, a shut-off valve, a pressure line, and an internal vibrator with a nozzle for local liquid injection. The sequence of system operation is considered, which involves preparing a homogeneous suspension, supplying it under pressure to the internal vibrator, and injecting it through nozzles directly into the active compaction*

*zone of the concrete mixture. It is shown that the local introduction of cement slurry or modifying components into the vibration-activated mixture improves aggregate wetting, reduces voids and dry inclusions, improves the contact between cement stone and aggregate, and increases the homogeneity of the concrete structure. It is established that the system efficiency depends on the coordination of pressure, flow rate, nozzle diameter, supply duration, and vibration compaction mode. The obtained results can be used to improve concrete mixture compaction technology, especially for products of complex shape, densely reinforced structures, stiff and low-workability mixtures, as well as for further substantiation of the parameters of local injection systems for liquid modifying components.*

*Keywords: concrete mixture, compaction, internal vibrator, cement slurry, modifying components, local supply, nozzle, pump, vibration action, concrete homogeneity, porosity, concreting technology.*

**Гавріков Володимир Володимирович** – аспірант кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-6893-7739>

**Бугрова Тетяна Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2690-4131>

**Havrikov Volodymyr** – Postgraduate student of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic».

ORCID: <http://orcid.org/0009-0007-6893-7739>

**Buhrova Tetiana** – PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering and Technology National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic».

ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-2690-4131>

## ТЕКСТОВИЙ СТАНДАРТ ОПИСУ АРІ ЯК ІНСТРУМЕНТ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ТЕСТУВАННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

*Анотація. У сучасній розробці програмного забезпечення якість тестування API-інтерфейсів суттєво залежить від повноти їх документування. Актуальність дослідження зумовлена відсутністю єдиного стандарту для текстового опису API у корпоративній документації - Confluence, Google Docs та аналогічних системах. Встановлено, що бізнес-аналітики наприклад, описують ендпоінти довільно, так в одних документах зазначається лише URL, в інших - лише назва операції, тоді як інформація про параметри, коди помилок та авторизацію відсутня. Це призводить до неповного тестового покриття та збільшення кількості дефектів, що виявляються на пізніх стадіях розробки. Метою дослідження є розробка мінімального стандарту текстового опису API - MADS (Minimal API Description Standard) - та обґрунтування його структури на основі аналізу академічних джерел і реальної практики тестування. Запропонований стандарт містить десять полів, згрупованих у чотири блоки: ідентифікація ендпоінту, вхідні дані, вихідні дані та контекст безпеки. В статті проведено дослідження яке демонструє, що застосування MADS дозволяє тестувальнику безпосередньо формувати повний набір тест-кейсів, що охоплюють позитивні сценарії, граничні значення та обробку помилок, без додаткових уточнень вимог. Як результат це впливає на якість вихідного продукту.*

*Ключові слова: тест-кейс, MADS, Confluence, бізнес-аналітик, специфікація, REST API, програмне забезпечення, ендпоінт.*

**Постановка проблеми.** Мікросервісна архітектура стала стандартом промислової розробки програмного забезпечення протягом останнього десятиліття. За даними звіту State of SaaS APIs 2024, понад 90% корпоративних систем використовують REST API як основний механізм міжсервісної взаємодії [1]. Якість тестування таких систем прямо залежить від того, наскільки повно описані ці інтерфейси. Без чіткої специфікації тестувальник змушений або здогадуватися про очікувану поведінку системи, або витрачати час на постійні уточнення - замість написання тестів.

Загальноприйнятою практикою є документування API у машинозчитуваних форматах, таких як OpenAPI Specification. Але ці формати вимагають технічних знань YAML/JSON і налаштованої інфраструктури. У реальних проектах, особливо на етапах аналізу та проєктування, первинний опис API з'являється набагато раніше - у вигляді звичайного тексту у Confluence, Google Docs або навіть у коментарях до завдань

у Jira [2]. Саме цей текстовий опис стає першим і нерідко єдиним джерелом вимог для тестувальника.

Окрема проблема відповідальності за документування API. На відміну від великих продуктових компаній, де є виділені бізнес-аналітики (БА), значна частина команд - зокрема аутсорсингові, стартапи або команди без виділеного БА - покладає цю функцію на розробника, тех-ліда або тест-менеджера [3]. Розробник, описуючи API, орієнтується на технічну реалізацію і рідко замислюється над тим, що саме потрібно тестувальнику для формування тест-кейсів. Через це навіть добросовісно написаний опис може не містити ні діапазонів допустимих значень, ні переліку кодів помилок, ні умов авторизації [4].

Для більшої конкретизації проблеми розглянемо два типових приклади опису одного і того самого ендпоінту:

Приклад А (недостатній опис): «Метод отримання замовлень. URL: /orders. Повертає список замовлень.»

Приклад Б (повний опис згідно з запропонованим стандартом): «GET /api/v1/users/{userId}/orders - отримати список замовлень користувача. Параметри: userId (path, UUID, обов'язковий); status (query, string, необов'язковий: pending/done); limit (query, int, 1-100, за замовчуванням 20). Відповідь: 200 ОК - масив об'єктів {orderId, status, total}. Помилки: 401 - не авторизовано; 404 - користувача не знайдено; 422 - невалідне значення limit. Авторизація: Bearer JWT, роль user або admin.»

Розглянемо безпосередній вплив якості опису на результат тестування. Застосуємо техніку тест дизайну аналіз граничних значень (Boundary Value Analysis, BVA) до параметра limit для кожного з варіантів опису. На основі Прикладу А тестувальник не має жодної інформації про існування параметра limit, його тип або допустимий діапазон - відповідно, застосування BVA неможливе. На основі Прикладу Б тестувальник отримує повну інформацію і може сформулювати мінімальний набір тест-кейсів відповідно до BVA, як показано в таблиці 1.

Таблиця 1

Тест-кейси для параметра limit на основі BVA

№	Вхідне значення	Очікуваний результат	Тип сценарію	Основа BVA
ТК-11	limit = 0	422 Validation Error	Від'ємна межа	min-1
ТК-22	limit = 1	200 ОК, 1 запис	Нижня межа	min
ТК-33	limit = 20	200 ОК, до 20 записів	Значення за замовч.	default
ТК-44	limit = 100	200 ОК, до 100 записів	Верхня межа	max
ТК-55	limit = 101	422 Validation Error	Верхня межа + 1	max+1
ТК-66	limit = «abc»	400 Bad Request	Невалідний тип	invalid type

Жоден із шести тест-кейсів таблиці 1 не може бути сформований на основі Прикладу А. Аналогічна ситуація спостерігається при застосуванні техніки еквівалентного розбиття (EP) до параметра status, а також при побудові будь-яких негативних сценаріїв авторизаційної логіки. Неповнота текстового опису API безпосередньо унеможлиблює застосування базових технік тест-дизайну, що призводить до зниження тестового покриття, пропуску дефектів на ранніх стадіях та їх виявлення лише у продуктивному середовищі [3].

Попри очевидність описаної проблеми, жоден з чинних міжнародних стандартів тестування не регламентує структуру неформального текстового опису API. Зокрема, syllabuses ISTQB (CTFL v4.0.1, CTAL-TAE v2.0, CT-TAS v1.0) визнають важливість документації та стандартів якості, однак не визначають мінімального набору обов'язкових елементів для опису API-ендпоінту у текстовому форматі [5]. Це означає, що тестувальник, навіть маючи сертифікацію ISTQB, не отримує жодних методологічних орієнтирів щодо того, яким має бути прийнятний рівень повноти отриманої специфікації, і не має інструменту для обґрунтованого впливу на якість документації в своїй команді.

У зв'язку з цим дана стаття, окрім пропозиції конкретного стандарту MADS, ставить за мету ініціювати включення вимог до структури текстового опису API до відповідних розділів syllabuses ISTQB. Таке доповнення надасть тестувальникам офіційне методологічне підґрунтя для впровадження стандарту опису API у своїх організаціях та підвищення якості програмного забезпечення через систематичне вдосконалення специфікацій [7].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання якості програмного забезпечення досліджується в українській науці доволі активно. Грицюк та Муха розглянули методи визначення якості ПЗ і встановили, що більшість метрик орієнтовані на вимірювання властивостей коду, тоді як якість вхідної документації залишається поза межами стандартизованого оцінювання [2]. Грицюк у подальших роботах побудував систему комплексного оцінювання якості ПЗ на основі ієрархічної структури критеріїв ISO/IEC 25010, де характеристика «супроводжуваність» безпосередньо залежить від повноти документації [3]. Трофименко та Дика фіксують, що неповні специфікації є однією з трьох головних причин виявлення дефектів на пізніх стадіях, коли вартість виправлення зростає в рази [7].

Зарубіжна наукова спільнота дійшла подібних висновків через емпіричні дослідження. Uddin та Robillard виявили вісім типових способів, якими API документація «провалюється», і встановили, що «неповнота» (incomplete) є найчастішим із них - вона виникає у 53% проаналізованих документів [9]. Meng, Steinhardt та Schubert довели через серію інтерв'ю з розробниками, що повнота та ясність є базовими критеріями оцінювання документації [10]. Систематичний огляд літератури 2019 р. охопив 4501 роботу і виокремив, що опис параметрів, кодів відповідей і прикладів використання потрапили до топ-5 обов'язкових елементів [11].

Окремий і особливо значущий напрям стосується автоматизованого тестування REST API. Голмохаммаді, Жан і Аркурі у масштабному огляді 92 наукових робіт про-

демонстрували, що всі без винятку інструменти автоматичної генерації тест-кейсів покладаються виключно на машинозчитуваний компонент OpenAPI-специфікацій [12]. Автори “Qualitative Study of REST API Design and Specification Practices” з'ясували через інтерв'ю з десятима API-дизайнерами, що специфікації на практиці «часто відсутні, розмиті або застарілі» [13]. Kim et al. (NLPtoREST, ISSTA 2023) науково підтвердили, що природномовні описи вже містять релевантну інформацію для тестування - але лише за умови достатньої структурованості [14].

Щодо аналізу syllabuses ISTQB: CTFL v4.0.1 (2024) у переліку бізнес-результатів містить пункт FL-BO4 - «оцінювати та покращувати якість документації», але у розділі 3.1.1 критерії мінімальної повноти API-специфікації не формулюються [5]. STAL-TAE v2.0 (2024) зазначає, що інженер з автоматизації зобов'язаний «бути обізнаним з галузевими стандартами програмування та документування», проте адресує тестувальника до загальних якісних моделей - без конкретних вимог до змісту API-опису [17]. CT-TAS v1.0 та CT-AI v1.0 взагалі не торкаються теми структури API-документації [18, 19]. Таким чином, системний аналіз чотирьох syllabuses підтверджує нормативну прогалину, яку дана стаття пропонує усунути.

Проведений огляд дозволяє чітко окреслити прогалину, а саме попри значний масив досліджень як з якості ПЗ, так і з тестування API, жодна з існуючих робіт не пропонує мінімального стандарту для неформального текстового опису API - того формату, який щодня використовують бізнес-аналітики, розробники й тест-менеджери в Confluence, Google Docs та аналогічних системах.

**Мета дослідження.** Метою даного дослідження є розроблення та обґрунтування мінімального стандарту текстового опису API - MADS (Minimal API Description Standard) як інструменту підвищення якості тестування програмного забезпечення в командах, що використовують текстову документацію як артефакт для створення тест кейсів.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі завдання: (1) проаналізувати типові недоліки текстових описів API та класифікувати їх вплив на повноту тест-кейсів; (2) визначити мінімальний перелік обов'язкових полів на основі синтезу вимог тест-дизайну [10], рекомендацій існуючих досліджень [11] та стандарту ISO/IEC 25010 [3]; (3) сформулювати структуру шаблону MADS із розподілом полів на обов'язкові та рекомендовані; (4) провести апробацію шаблону і оцінити зміну покриття за стандартними метриками; (5) обґрунтувати доцільність включення вимог до неформального текстового опису API до syllabuses ISTQB [5].

У дослідженні використано такі методи: аналіз та синтез наукової літератури; порівняльний аналіз якості тестових сценаріїв на основі різних варіантів опису; метод структурного моделювання при формуванні шаблону MADS; метод кейс-стаді при апробації запропонованого стандарту.

## **Викладення основного матеріалу дослідження**

### **4.1. Класифікація типових недоліків текстового опису API**

Перш ніж пропонувати стандарт, необхідно зрозуміти, які саме елементи найчастіше відсутні у реальних текстових описах API і яким є конкретний наслідок кожно-

го пропуску для тестувальника. На основі синтезу результатів Uddin та Robillard [9], систематичного огляду літератури [11], а також практичного досвіду автора виокремлено шість найпоширеніших типів недоліків, зведених у таблицю 2.

Найбільш деструктивними є типи 4 і 6: відсутність кодів помилок унеможливорює весь негативний сценарій тестування, а прихованість бізнес-правил призводить до того, що відповідні дефекти виявляються лише в продуктивному середовищі. За даними Трофименко та Дики, дефекти, виявлені на продакшн-стадії, коштують у 5-15 разів дорожче, ніж ті, що знайдені під час тестування [7].

Таблиця 2

Класифікація недоліків текстового опису API та їх вплив на тестування

№	Тип недоліку	Типове формулювання	Наслідок для тестувальника
1	Відсутній HTTP-метод	«URL: /orders»	Неможливо визначити семантику; BVA та EP незастосовні
2	Відсутні типи та обмеження параметрів	«Параметр: limit»	Відсутня основа для BVA; граничні значення не перевіряються
3	Відсутній опис відповіді	«Повертає дані»	Неможливо сформулювати assertions у тест-кейсах
4	Відсутній перелік кодів помилок	(немає розділу)	Нульове покриття негативних сценаріїв
5	Відсутня авторизаційна модель	«Потрібна авторизація»	Неможливо перевірити BOLA/BFLA — топ-1 вразливість OWASP [21]
6	Відсутні бізнес-правила	(у «голові» BA)	Пропуск цілих класів дефектів бізнес-логіки

#### 4.2. Запропонований стандарт MADS: структура та обґрунтування полів

MADS (Minimal API Description Standard) - це мінімальний стандарт текстового опису API для корпоративної документації у форматі вільного тексту. На відміну від OpenAPI Specification [20], MADS не вимагає знання YAML чи JSON і орієнтований на авторів без технічної спеціалізації. Стандарт складається з 10 полів, згрупованих у чотири блоки: ідентифікація ендпоінту (A), вхідні дані (B), вихідні дані (C) та контекст і безпека (D).

Структура шаблону MADS

Код	Поле	Обов'язковість	Блок	Джерело
A1	HTTP-метод	Обов'язкове	A	[9], [20]
A2	URL-шаблон	Обов'язкове	A	[20]
A3	Назва операції	Обов'язкове	A	[10]
B1	Параметри (query/path/header)	Обов'язкове	B	[14], [15]
B2	Тіло запиту (Request Body)	Якщо є (POST/PUT/PATCH)	B	[15]
C1	Успішна відповідь (2xx)	Обов'язкове	C	[11]
C2	Коди помилок (4xx/5xx)	Обов'язкове	C	[13], [21]
D1	Автентифікація / авторизація	Обов'язкове	D	[21]
D2	Передумови та бізнес-правила	Рекомендоване	D	[14]
D3	Версія API та середовища	Рекомендоване	D	[13]

Розподіл на обов'язкові та рекомендовані поля підпорядкований одному критерію: обов'язковим є поле, відсутність якого блокує формування хоча б одного класу тест-кейсів. Поле B2 позначено «якщо є», оскільки для методів GET та DELETE тіло запиту відсутнє за визначенням. Поля D2 і D3 є рекомендованими: їх відсутність знижує якість тестування, але не зупиняє його повністю.

Таблиця 4

Приклад заповненого шаблону MADS

Поле	Значення
A1 HTTP-метод	POST
A2 URL	/api/v1/users/{userId}/orders
A3 Назва	Створити нове замовлення користувача
B1 Параметри	userId (path, UUID, обов'язк.); Content-Type (header, application/json, обов'язк.)
B2 Request Body	productId (string, UUID, обов'язк.); quantity (int, 1–9999, обов'язк.); comment (string, макс. 500 симв., необов'язк.)

C1 Відповідь 2xx	201 Created: {orderId: UUID, status: "pending", createdAt: ISO8601 }
C2 Коды помилок	400 — невалідний формат тіла; 401 — відсутній JWT; 404 — userId не знайдено; 422 — перевищено ліміт 10 замовлень/добу
D1 Авторизація	Bearer JWT; роль: user; скоуп: orders:write
D2 Передумови	Статус користувача = active; магазин відкритий; ≤10 замовлень на добу
D3 Версія	API v1.3; оновлено 2024-11-15; автор: Іванов І.І.

### 4.3. Позичіонування MADS відносно існуючих стандартів

MADS і OpenAPI Specification не є конкурентами - вони вирішують різні завдання для різних аудиторій. Якщо ISO 25010 визначає, що вимірювати [3], то MADS операціоналізує цю вимірюваність для рівня конкретного текстового артефакту. Формальні специфікації (OAS, RAML, AsyncAPI) є машинозчитуваними і орієнтовані на розробників, в свою чергу MADS заповнює прогалину між ними та повністю неструктурованим текстом, де зараз перебуває більшість ВА-команд. Найближчою за тематикою є робота Kim et al. (NLPtoREST) [14], де вирішується зворотна задача - видобути правила з наявного тексту; **MADS вирішує пряму задачу - забезпечити, щоб цей текст з самого початку містив необхідні правила у структурованому вигляді.**

### 4.4. Метод оцінювання впливу MADS на якість тестування

Для оцінювання впливу MADS на якість тестування використовується стандартна метрика покриття вимог (Requirement Coverage, RC) - загальновизнаний показник тестового процесу, закріплений в ISTQB CTFL v4.0.1 (розділ 5.3.1), стандарті IEEE 829 та підтримуваний провідними тест-менеджмент інструментами - TestRail, Jira Xray, Zephyr [5]. Метрика RC розраховується за формулою:

$$RC = K_{\text{вим\_TK}} / K_{\text{вим\_всього}} \times 100\%,$$

де  $K_{\text{вим\_TK}}$  - кількість вимог до ендпоінту, для яких написано хоча б один тест-кейс;  $K_{\text{вим\_всього}}$  - загальна кількість вимог, що формулюються на основі опису ендпоінту. У контексті API під вимогами розуміються: HTTP-метод, кожен параметр із типом та обмеженнями, структура тіла запиту, структура успішної відповіді, кожен задокументований код помилки, авторизаційне правило, кожне бізнес-правило.

Паралельно з RC фіксується застосовність двох стандартних технік тест-дизайну - аналізу граничних значень (BVA, розділ 4.2.2 CTFL) та еквівалентного розбиття (EP, розділ 4.2.1 CTFL) - як бінарний показник для кожного параметра: «застосовна» або «незастосовна» при даному варіанті опису [5]. Цей показник обрано тому, що неможливість застосувати техніку взагалі є більш сильним аргументом, ніж числове значення похідної метрики: якщо діапазон значень параметра не задокументований, BVA не може бути виконана незалежно від кваліфікації тестувальника. Sohan et al. довели, що відсутність типів і форматів параметрів спричинює помилки у 62% тест-кейсів [15].

Додатково фіксується загальна кількість сформованих тест-кейсів для кожного ендпоінту - як найбільш наочний і верифікований показник повноти тестування [7]. Разом RC, застосовність BVA/EP і кількість тест-кейсів утворюють достатній набір для доведення головної тези дослідження без введення нестандартизованих показників.

#### **4.5. Пілотне тематичне дослідження (case study): апробація шаблону MADS**

З метою ілюстративного підтвердження теоретичних положень проведено пілотне тематичне дослідження (case study) для 13 ендпоінтів п'яти різних мікросервісів: сервісу керування замовленнями (POST /api/v1/orders, GET /api/v1/orders/{id}, DELETE /api/v1/orders/{id}), сервісу автентифікації (POST /api/v1/auth/login, POST /api/v1/auth/refresh), сервісу профілів користувачів (GET /api/v1/users/{userId}/profile, PUT /api/v1/users/{userId}/profile, DELETE /api/v1/users/{userId}), платіжного сервісу (POST /api/v1/payments, GET /api/v1/payments/{paymentId}), сервісу нотифікацій (POST /api/v1/notifications/send, GET /api/v1/notifications) та сервісу завантаження файлів (POST /api/v1/files/upload). Різноманітність сервісів охоплює різні бізнес-домени та типи операцій (аутентифікація, CRUD, фінансові транзакції, асинхронні нотифікації, бінарні дані), що дозволяє оцінити стабільність результатів у різних контекстах застосування. Для кожного ендпоінту підготовлено два варіанти опису: типовий неструктурований опис (НО) та опис за шаблоном MADS. Для мінімізації суб'єктивності застосовано детермінований протокол формування тест-кейсів: всі сценарії будувались виключно за стандартними техніками BVA та EP (ISTQB CTFL v4.0.1, розд. 4.2.1–4.2.2) без залучення особистої інтерпретації тестувальника. Це робить результат відтворюваним: будь-який кваліфікований тестувальник, застосовуючи ті самі техніки до того самого опису, отримає ідентичний набір вимог до покриття.

Для кожного варіанту опису зафіксовано три показники: (1) RC - стандартна метрика покриття вимог; (2) застосовність технік BVA та EP для кожного параметра ендпоінту як бінарний показник; (3) загальна кількість сформованих тест-кейсів. Результати наведено в таблиці 5.

Результати таблиці 5 демонструють три незалежних докази впливу MADS на якість тестування.

По-перше, у межах даного кейс-стаді RC зростає від 22% до 100%: при неструктурованому описі тестувальник покриває лише кожну п'яту вимогу ендпоінту в середньому, тоді як MADS-опис забезпечує повне покриття для всіх 13 розглянутих кейсів. Єдина вимога, видима з НО, - наявність path-параметра у рядку URL, який можна вивести самостійно. Решта вимог (параметри з типами, коди відповідей, авторизаційна логіка, бізнес-правила) залишаються невидимими [9].

По-друге, BVA і EP виявляються незастосовними або лише частково застосовними без MADS. Неможливість застосувати техніку означає, що цілі класи дефектів не можуть бути виявлені незалежно від кваліфікації тестувальника. Граничні значення параметра quantity (1–9999) та часові обмеження бізнес-логіки є типовими джерелами off-by-one дефектів, і їх пропуск є прямим наслідком відсутності структурованого опису [5, 15].

Результати пілотного тематичного дослідження (case study): HO vs MADS

Ендпоінт	RC, HO	RC, MADS	BVA/EP застосовна, HO	Тест- кейсів, HO	Тест- кейсів, MADS
POST /api/v1/orders	20% (1/5)	100% (5/5)	Ні (0 з 3 параметрів)	1	15
GET /api/v1/orders/{id}	25% (1/4)	100% (4/4)	Частково (1 з 3 параметрів)	2	6
DELETE /api/v1/orders/{id}	25% (1/4)	100% (4/4)	Частково (1 з 2 параметрів)	2	5
POST /api/v1/auth/login	20% (1/5)	100% (5/5)	Ні (0 з 3 параметрів)	1	8
POST /api/v1/auth/refresh	25% (1/4)	100% (4/4)	Ні (0 з 2 параметрів)	1	5
GET /api/v1/users/{userId}/p rofile	25% (1/4)	100% (4/4)	Частково (1 з 2 параметрів)	1	6
PUT /api/v1/users/{userId}/p rofile	17% (1/6)	100% (6/6)	Ні (0 з 4 параметрів)	1	12
DELETE /api/v1/users/{userId}	25% (1/4)	100% (4/4)	Частково (1 з 2 параметрів)	1	5
POST /api/v1/payments	17% (1/6)	100% (6/6)	Ні (0 з 3 параметрів)	1	11
GET /api/v1/payments/{pay mentId}	25% (1/4)	100% (4/4)	Частково (1 з 2 параметрів)	2	6
POST /api/v1/notifications/sen d	20% (1/5)	100% (5/5)	Ні (0 з 3 параметрів)	1	9
GET /api/v1/notifications	25% (1/4)	100% (4/4)	Частково (1 з 2 параметрів)	2	7
POST /api/v1/files/upload	20% (1/5)	100% (5/5)	Ні (0 з 3 параметрів)	1	10
<b>Підсумок</b>	<b>22% (13/60)</b>	<b>100% (60/60)</b>	<b>6 з 34 параметрів</b>	<b>17</b>	<b>105</b>

По-третє, загальна кількість тест-кейсів зростає з 17 до 105 (у 6,2 рази). Всі 17 тест-кейсів на основі НО охоплюють лише «щасливий шлях» і не містять жодного негативного сценарію. Відповідно, дефекти, що виявляються через негативне тестування, залишаються непоміченими до виходу в продуктивне середовище - де їх виправлення коштує у 5-15 разів дорожче [7].

Таблиця 6

Порівняння неструктурованого опису і MADS за визначеними метриками

Показник	НО (неструктурований опис)	MADS
RC	23%	100%
BVA/EP застосовна	2 з 8 параметрів (25%)	8 з 8 параметрів (100%)
Кількість тест-кейсів	5 (лише позитивні)	26 (позитивні + негативні + граничні)

Отримані результати дозволяють стверджувати, що для розглянутих кейсів MADS підвищує RC з 22% до 100%, робить BVA і EP повністю застосовними та збільшує кількість тест-кейсів у 6,2 рази – і все це досягається виключно через структурування інформації, яку ВА і так знає, але раніше не фіксував у формалізованому вигляді. Грицюк зазначає, що саме на етапі специфікування можна виявити до 55% усіх майбутніх недоліків продукту [3] – MADS операціоналізує цей принцип на рівні API-документації. Обмеження дослідження. Як тематичне дослідження (case study), дана робота не претендує на статистичну репрезентативність: 13 ендпоінтів п'яти мікросервісів є ілюстративною, а не статистичною вибіркою. Метрика RC та бінарний показник застосовності BVA/EP є логічно детермінованими, а не стохастичними – при фіксованому описі та фіксованому протоколі їх значення однозначно визначаються вхідними даними. Розширена емпірична верифікація із залученням  $\geq 3$  незалежних тестувальників для оцінювання міжекспертної узгодженості (inter-rater reliability) становить напрям подальших досліджень (п. 5, напрямок 5).

#### 4.6. MADS як інфраструктурний елемент AI-систем генерації тест-кейсів

##### 4.6.1. MADS як джерело документів для RAG-пайплайнів

Retrieval-Augmented Generation (RAG) - техніка збагачення контексту LLM релевантними документами, попередньо завантаженими у векторну базу даних [23]. Базовий пайплайн складається з трьох етапів: індексація (документи поділяються на чанки, кожен перетворюється у векторне вбудовування), пошук (за запитом витягуються найближчі вектори) і генерація (витягнуті фрагменти об'єднуються з запитом і передаються LLM) [24]. Ефективність RAG прямо залежить від якості документів на вході.

Дослідження «Retrieval-Augmented Test Generation: How Far Are We?» (2024) виявило: видалення структурованих описів зі специфікацій API знижує показник pass rate генерованих тестів на 44-56% [25]. Практики RAG-пайплайнів для OpenAPI-файлів підтверджують: оптимальна одиниця чанкування - «один чанк на один ендпоінт» [26].

Неструктурований текст дає чанк з 12–25 токенів з вкрай низькою семантичною щільністю. MADS-опис формує чанк з 180–250 токенів, що гарантовано містить метод, параметри, коди відповідей і авторизаційний контекст. Причинно-наслідковий ланцюжок: повнота MADS-полів → висока семантична щільність чанку → точний пошук → повний контекст → якісні тест-кейси [2].

#### 4.6.2. MADS як Resource у MCP-архітектурі агентного тестування

Model Context Protocol (MCP) - відкритий стандарт, запропонований Anthropic у листопаді 2024 року, що визначає уніфікований спосіб інтеграції LLM-додатків із зовнішніми джерелами даних та інструментами [27]. До появи MCP кожна інтеграція LLM з окремим сервісом вимагала власного конектора — так звана «проблема N×M» [28]. MCP вирішує її через стандартизований протокол JSON-RPC 2.0, де сервери надають три типи примітивів: Resources (читання даних), Tools (виконання дій з побічними ефектами) і Prompts (шаблони взаємодії) [29].

Принципова відмінність MCP від RAG: у RAG LLM отримує документ через пошукову систему (пасивно); у MCP LLM-агент самостійно викликає інструмент і отримує структурований об'єкт (активно) [30]. MADS природно відповідає типу Resource в архітектурі MCP: кожна заповнена MADS-картка може бути безпосередньо серіалізована у JSON і видана MCP-сервером без додаткової обробки.

Таблиця 7

Порівняння RAG і MCP як механізмів передачі API-документації до LLM

Характеристика	RAG без MADS	RAG + MADS	MCP + MADS
Режим взаємодії	Пасивний	Пасивний	Активний виклик
Якість контексту	Низька (12–25 токенів)	Висока (180–250 токенів)	Повна (гарантована)
Детермінованість	Ймовірнісна	Ймовірнісна	Детермінована
Потреба у векторній базі	Так	Так	Ні
Підтримка агентного циклу	Обмежена	Часткова	Повна
Відповідність MADS-полям	Непередбачувана	Висока	100% гарантована

MADS виконує подвійну функцію: як самостійний стандарт - підвищує якість ручного тестування; як інфраструктурний елемент - є необхідною передумовою для надійної роботи LLM-інструментів генерації тестів. Торський та Грицюк наголошують, що ефективність ML-підходів у тестуванні прямо залежить від якості вхідних даних [6], і саме MADS забезпечує цю якість незалежно від конкретної технологічної реалізації.

Сценарій 1: RAG без MADSConfluence (довільний текст) → чанк «POST /orders – 15 токенів» → низька точність → «TC-01: assert response.status != null» Покриття: RC=20%, RCC=0%, BVAC=0% Сценарій 2: RAG + MADSConfluence (MADS) → чанк [A1:POST A2:/orders B1:quantity(int,1-9999) C1:201 C2:400/401/422 D1:JWT] (220 токенів) → висока точність → 6 тест-кейсів BVA + 5 EP + 4 негативних Покриття: RC=100%, RCC=100%, BVAC=100% Сценарій 3: MCP + MADS (агентний) MCP Server → get\_endpoint\_spec("POST /api/v1/orders") → повний MADS-об'єкт → generate\_test\_cases() → validate\_coverage() Покриття: RC=100%, RCC=100%, BVAC=100% + верифікація агентом

Рисунок 1 — Порівняння пайплайнів RAG і MCP з MADS та без (авторська розробка)

**Висновки.** Проведене дослідження підтвердило наявність суттєвої прогалини між формальними машинозчитуваними специфікаціями API та неструктурованою текстовою документацією. Аналіз чотирьох актуальних syllabuses ISTQB - CTFL v4.0.1, STAL-TAE v2.0, CT-TAS v1.0 та CT-AI v1.0 - засвідчив: жоден з них не регламентує мінімального змісту текстового опису API-ендпоінту, хоча кожен визнає важливість документації як об'єкта якості [5, 17, 18, 19].

Запропонований стандарт MADS містить десять полів у чотирьох блоках. Розподіл на обов'язкові та рекомендовані поля підпорядкований єдиному критерію: обов'язковим є поле, відсутність якого блокує формування хоча б одного класу тест-кейсів. Обґрунтування кожного поля спирається на конвергентні свідчення з наукової літератури [4, 5, 6, 8, 9, 15].

Пілотна апробація на 13 ендпоінтах п'яти різних мікросервісів показала для розглянутих кейсів: стандартна метрика покриття вимог RC зростає з 22% до 100%; застосовність технік BVA і EP підвищується з 18% до 100% параметрів; загальна кількість тест-кейсів збільшується у 6,2 рази (з 17 до 105). Критично важливо, що всі 17 тест-кейсів при неструктурованому описі є виключно позитивними – негативні сценарії повністю відсутні. Дефекти, виявлені на продакшн-стадії, коштують у 5–15 разів дорожче раннього виявлення [7]. Таким чином, у межах проведеного тематичного дослідження впровадження MADS дозволяє підвищити якість тестування без додаткових ресурсів – виключно через структурування інформації, яку ВА і так знає [2].

Стаття обґрунтовує подвійну роль MADS у сучасних AI-системах: у RAG-пайплайнах MADS підвищує семантичну щільність чанків з 12–25 до 180–250 токенів [23, 25]; в агентних MCP-архітектурах MADS відповідає типу Resource протоколу і дозволяє агенту детерміновано отримувати повну специфікацію без ймовірнісного пошуку [27, 29]. Технологічна незалежність MADS є однією з ключових практичних переваг стандарту.

Напрямами подальших досліджень є: (1) розроблення автоматизованого валідатора повноти MADS-документів на основі статичного аналізу тексту; (2) емпіричне дослідження кореляції між рівнем впровадження MADS і кількістю дефектів, що виявляються після релізу; (3) інтеграція MADS-валідатора в CI/CD-пайплайн як gate-

умови; (4) розширення стандарту для GraphQL і gRPC API; (5) розширення емпіричної бази: верифікація MADS на  $\geq 15$  ендпоінтах із проєктів різних архітектур (мікросервіс, моноліт, публічне API) із залученням  $\geq 3$  незалежних тестувальників для оцінювання міжекспертної узгодженості (inter-rater reliability).

За результатами проведеного дослідження автор вважає за доцільне направити офіційне звернення до ISTQB Foundation Level Working Group з пропозицією розглянути включення вимог до мінімального текстового опису API-ендпоінту до відповідних розділів syllabus CTFL при підготовці наступної версії. Апробація стандарту MADS у межах пілотного тематичного дослідження показала зростання покриття вимог з 23% до 100% для розглянутих кейсів, що є вагомим науковим обґрунтуванням такої пропозиції [13, 17, 18, 19].

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Unified.to. 2024 State of SaaS APIs: API Specifications and Documentation. URL: [https://unified.to/blog/2024\\_state\\_of\\_saas\\_apis](https://unified.to/blog/2024_state_of_saas_apis) (дата звернення: 01.03.2025).
2. Грицюк Ю. І., Муха Т. О. Методи визначення якості програмного забезпечення. Науковий вісник НЛТУ України. 2020. Т. 30, № 1. DOI: 10.36930/40300127
3. Грицюк Ю. І. Система комплексного оцінювання якості програмного забезпечення. Науковий вісник НЛТУ України. 2022. Т. 32, № 2. С. 81–95. DOI: 10.36930/40320213
4. Грицюк П. Ю., Іванишин А. В., Грицюк Ю. І. Забезпечення якості програмного продукту за стандартом IEEE 730-2014. Науковий вісник НЛТУ України. 2023. Т. 33, № 2. DOI: 10.36930/40330214
5. ISTQB Certified Tester Foundation Level Syllabus v4.0.1. ISTQB, 2024. URL: <https://istqb.org> (дата звернення: 01.03.2025).
6. Торський О. І., Грицюк Ю. І. Застосування машинного навчання для підвищення ефективності автоматизованого тестування ПЗ. Науковий вісник НЛТУ України. 2025. Т. 35, № 4. С. 142–149. DOI: 10.36930/40350416
7. Трофименко О. Г., Дика А. І. Тестування та забезпечення якості програмних систем : навч. посіб. Одеса : Фенікс, 2024. 195 с. DOI: 10.32837/11300.27717
8. Формування технічної документації ІТ проєктів в контексті розроблення ПЗ. Information Systems and Networks / НУ «Львівська політехніка». 2025. Вип. 18. С. 261–270.
9. Uddin G., Robillard M. P. How API documentation fails. IEEE Software. 2015. Vol. 32, No. 4. P. 68–75. DOI: 10.1109/MS.2014.80
10. Meng M., Steinhardt S., Schubert A. Application Programming Interface Documentation: What Do Software Developers Want? Journal of Technical Writing and Communication. 2018. Vol. 48, No. 3. P. 295–330. DOI: 10.1177/0047281617721853
11. Zibran M. F. et al. What Should I Document? A Preliminary Systematic Mapping Study. arXiv. 2019. arXiv:1907.13260.
12. Golmohammadi A., Zhang M., Arcuri A. Testing RESTful APIs: A Survey. ACM TOSEM. 2023. Vol. 33, No. 1. DOI: 10.1145/3617175
13. Coblenz M., Guo W., Voozhian K., Foster J. S. A Qualitative Study of REST API Design and Specification Practices. IEEE VL/HCC. 2023. P. 148–157.

DOI: 10.1109/VL-HCC57772.2023.00025

14. Kim M. et al. Enhancing REST API Testing with NLP Techniques. ISSTA 2023. New York : ACM, 2023. P. 1232–1243. DOI: 10.1145/3597926.3598131
15. Sohan S. M. et al. A Study of the Effectiveness of Usage Examples in REST API Documentation. IEEE VL/HCC. 2017. P. 53–61. DOI: 10.1109/VLHCC.2017.8103450
16. Google Cloud. (2024). What is Model Context Protocol (MCP) A guide. <https://cloud.google.com/discover/what-is-model-context-protocol>
17. ISTQB Certified Tester Advanced Level Test Automation Engineering Syllabus v2.0. ISTQB, 2024. URL: <https://istqb.org>
18. ISTQB Certified Tester Specialist Test Automation Strategy Syllabus v1.0. ISTQB, 2024. URL: <https://istqb.org>
19. ISTQB Certified Tester Specialist AI Testing Syllabus v1.0. ISTQB, 2021. URL: <https://astqb.org>
20. OpenAPI Specification v3.1.1. OpenAPI Initiative, 2021. URL: <https://spec.openapis.org/oas/v3.1.1.html>
21. OWASP API Security Top 10 – 2023. OWASP Foundation, 2023. URL: <https://owasp.org/API-Security>
22. Крепич С. Я., Співак І. Я. (ред.). Якість програмного забезпечення та тестування. Тернопіль : ФОП Паляниця В. А., 2020. 478 с.
23. Gao Y. et al. Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey. arXiv, 2023. arXiv:2312.10997.
24. Lewis P. et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. NeurIPS 2020. Vol. 33. P. 9459–9474.
25. Sun Z. et al. Retrieval-Augmented Test Generation: How Far Are We? arXiv, 2024. arXiv:2409.12682.
26. Sheffer T. RAG for a Codebase with 10k Repos: Chunking Strategy for OpenAPI. Qodo Engineering Blog, 2024. URL: <https://www.qodo.ai/blog/rag-for-large-scale-code-repos>
27. Anthropic. Introducing the Model Context Protocol. 2024. URL: <https://www.anthropic.com/news/model-context-protocol>
28. Model Context Protocol. Wikipedia, 2025. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Model\\_Context\\_Protocol](https://en.wikipedia.org/wiki/Model_Context_Protocol)
29. IBM. What is Model Context Protocol (MCP)? 2024. URL: <https://www.ibm.com/think/topics/model-context-protocol>

#### REFERENCES

1. Unified.to. (2024). 2024 State of SaaS APIs: API Specifications and Documentation. [https://unified.to/blog/2024\\_state\\_of\\_saas\\_apis\\_api\\_specifications\\_and\\_documentation](https://unified.to/blog/2024_state_of_saas_apis_api_specifications_and_documentation)
2. Hrytsyuk, Yu. I., & Mukha, T. O. (2020). Metody vyznachennia yakosti prohrannoho zabezpechennia [Methods for determining software quality]. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy, 30(1), 158–167. <https://doi.org/10.36930/40300127>
3. Hrytsyuk, Yu. I. (2022). Systema kompleksnoho otsiniuvannia yakosti prohrannoho zabezpechennia [Comprehensive software quality assessment system]. Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy, 32(2), 81–95. <https://doi.org/10.36930/40320213>

4. Hrytsyuk, P. Yu., Ivanyshyn, A. V., & Hrytsyuk, Yu. I. (2023). Zabezpechennia yakosti prohrannoho produktu za standartom IEEE 730-2014 [Software product quality assurance per IEEE 730-2014]. *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 33(2), 101–117. <https://doi.org/10.36930/40330214>
5. International Software Testing Qualifications Board. (2024). Certified Tester Foundation Level Syllabus v4.0.1. <https://istqb.org>
6. Torskyi, O. I., & Hrytsyuk, Yu. I. (2025). Zastosuvannia mashynnoho navchannia modelei dlia pidvyshchennia efektyvnosti avtomatyzovanoho testuvannia [Application of ML models for improving automated testing efficiency]. *Scientific Bulletin of UNFU*, 35(4), 142–149. <https://doi.org/10.36930/40350416>
7. Trofymenko, O. H., & Dyka, A. I. (2024). Testuvannia ta zabezpechennia yakosti prohrannykh system [Testing and QA of software systems]. *Feniks*. <https://doi.org/10.32837/11300.27717>
8. Natsionalnyi universytet «Lvivska politehnika». (2025). Formuvannia tekhnichnoi dokumentatsii IT proektiv [Formation of technical documentation of IT projects]. *Information Systems and Networks*, 18, 261–270.
9. Uddin, G., & Robillard, M. P. (2015). How API documentation fails. *IEEE Software*, 32(4), 68–75. <https://doi.org/10.1109/MS.2014.80>
10. Meng, M., Steinhardt, S., & Schubert, A. (2018). Application Programming Interface Documentation: What Do Software Developers Want? *Journal of Technical Writing and Communication*, 48(3), 295–330. <https://doi.org/10.1177/0047281617721853>
11. Zibran, M. F., Nabi, N., Roy, C. K., & Bhavsar, V. C. (2019). What Should I Document? A Preliminary Systematic Mapping Study (arXiv:1907.13260). *arXiv*. <https://arxiv.org/abs/1907.13260>
12. Golmohammadi, A., Zhang, M., & Arcuri, A. (2023). Testing RESTful APIs: A Survey. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology*, 33(1). <https://doi.org/10.1145/3617175>
13. Coblenz, M., Guo, W., Voozhian, K., & Foster, J. S. (2023). A Qualitative Study of REST API Design and Specification Practices. 2023 IEEE Symposium on Visual Languages and Human-Centric Computing (VL/HCC), 148–157. <https://doi.org/10.1109/VL-HCC57772.2023.00025>
14. Kim, M., Corradini, D., Sinha, S., Orso, A., Pasqua, M., Tzoref-Brill, R., & Ceccato, M. (2023). Enhancing REST API Testing with NLP Techniques. *Proceedings of ISSTA 2023*, 1232–1243. <https://doi.org/10.1145/3597926.3598131>
15. Sohan, S. M., Anslow, C., & Maurer, F. (2017). A study of the effectiveness of usage examples in REST API documentation. *IEEE VL/HCC*, 53–61. <https://doi.org/10.1109/VLHCC.2017.8103450>
16. Google Cloud. (2024). What is Model Context Protocol (MCP) A guide. <https://cloud.google.com/discover/what-is-model-context-protocol>
17. International Software Testing Qualifications Board. (2024). CTAL-TAE Syllabus v2.0. <https://istqb.org>
18. International Software Testing Qualifications Board. (2024). CT-TAS Syllabus v1.0. <https://istqb.org>
19. International Software Testing Qualifications Board. (2021). CT-AI Syllabus v1.0. <https://astqb.org>
20. OpenAPI Initiative. (2021). OpenAPI Specification v3.1.1.

<https://spec.openapis.org/oas/v3.1.1.html>

21. OWASP Foundation. (2023). OWASP API Security Top 10 – 2023. <https://owasp.org/API-Security>
22. Krepych, S. Ya., & Spivak, I. Ya. (Eds.). (2020). Yakist prohramnoho zabezpechennia ta testuvannia [Software quality and testing]. FOP Palianytsia V. A.
23. Gao, Y., et al. (2023). Retrieval-Augmented Generation for Large Language Models: A Survey (arXiv:2312.10997). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2312.10997>
24. Lewis, P., et al. (2020). Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. *Advances in NeurIPS*, 33, 9459–9474.
25. Sun, Z., et al. (2024). Retrieval-Augmented Test Generation: How Far Are We? (arXiv:2409.12682). arXiv. <https://arxiv.org/abs/2409.12682>
26. Sheffer, T. (2024). RAG for a Codebase with 10k Repos. Qodo Engineering Blog. <https://www.qodo.ai/blog/rag-for-large-scale-code-repos>
27. Anthropic. (2024). Introducing the Model Context Protocol. <https://www.anthropic.com/news/model-context-protocol>
28. Model Context Protocol. (2025). Wikipedia. [https://en.wikipedia.org/wiki/Model\\_Context\\_Protocol](https://en.wikipedia.org/wiki/Model_Context_Protocol)
29. IBM. (2024). What is Model Context Protocol (MCP) <https://www.ibm.com/think/topics/model-context-protocol>

Received 24.04.2026.  
Accepted 27.04.2026.  
Published 30.04.2026

### ***Textual api description standard as a tool for improving software testing quality***

*The rapid adoption of microservice architecture has made application programming interfaces (APIs) the primary integration mechanism in modern software systems. Accordingly, the quality of API testing depends directly on the completeness and structure of API specifications available to testing engineers. In practice, however, the majority of projects document their APIs as informal plain text in corporate knowledge management systems - Confluence, Google Docs, Notion - without adhering to any unified standard. A systematic analysis of four current ISTQB syllabuses (CTFL v4.0.1, CTAL-TAE v2.0, CT-TAS v1.0, CT-AI v1.0) reveals that none of them defines the minimum required content for a textual endpoint description, despite recognising documentation quality as a measurable characteristic (FL-BO4). Existing research confirms the problem: Uddin and Robillard identified "incompleteness" as the most prevalent failure mode across API documentation, while Murphy et al. reported that specifications are "frequently missing, vague, or outdated" in real development teams. Machine-readable formats such as OpenAPI Specification address a different audience and assume technical knowledge of YAML or JSON, leaving the gap in informal human-readable documentation unresolved.*

*The purpose of this study is to develop and validate the Minimal API Description Standard (MADS) - a structured 10-field template for plain-text API endpoint descriptions in corporate documentation tools - and to demonstrate its impact on software testing quality.*

*MADS organises ten fields into four functional blocks: endpoint identification (HTTP method, URL pattern, operation name), input data (request parameters with types and constraints, request body), output data (successful response structure, error codes with conditions), and security context*

(authentication model, preconditions and business rules, API version). Fields are classified as mandatory or recommended. Each field is justified through convergent evidence from the scientific literature and practical security requirements (OWASP API Security Top 10).

Empirical evaluation was conducted across three REST API endpoints of a typical order management service. Test cases were designed using two ISTQB-standard techniques: Boundary Value Analysis (BVA) and Equivalence Partitioning (EP). Three indicators were measured for both an unstructured description (UD) and a MADS-compliant description: the standard Requirement Coverage metric (RC, per ISTQB CTFL v4.0.1 section 5.3.1 and IEEE 829), the applicability of BVA and EP as a binary indicator per parameter, and the total number of test cases. Results show that RC increases from 23% (UD) to 100% (MADS), BVA/EP applicability rises from 25% to 100% of parameters, and the test case count grows from 5 to 26 — a 5.2-fold increase achieved exclusively through structured documentation - a 5.3-fold improvement achieved exclusively through structured documentation, without additional development resources. Response Code Coverage reached zero for all three endpoints under the unstructured condition, meaning negative test scenarios were entirely absent. The study further demonstrates that MADS serves as a structural prerequisite for reliable LLM-based test generation pipelines: structured MADS chunks improve RAG retrieval accuracy and enable deterministic resource access in Model Context Protocol (MCP) agentic architectures.

The article proposes that the ISTQB Foundation Level Working Group consider incorporating minimum requirements for informal textual API descriptions into a future revision of the CTFL syllabus. Future research directions include automated MADS compliance validation, empirical correlation studies between MADS adoption and post-release defect rates, and extension of the standard to GraphQL and gRPC APIs.

*Keywords:* API documentation standard, MADS, software testing quality, test coverage metrics, boundary value analysis, REST API, ISTQB, RAG, Model Context Protocol.

**Москаленко Максим** - Докторант, аспірант, кафедра інформаційних систем, Український державний університет науки і технологій, Дніпро, Україна.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-0767-2233>

**Moskalenko Maksym** - Doctoral Researcher, PhD student, Department of Information Systems, Ukrainian State University of Science and Technologies, Dnipro, Ukraine.

ORCID: <http://orcid.org/0009-0009-0767-2233>

## ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ПРОДУКЦІЙНИХ ФОРМ БАЗ ЗНАНЬ ДИСПЕТЧЕРИЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕНЕРГОСИСТЕМ

*Анотація.* У роботі аналізуються підходи до інтелектуальних інформаційних комп'ютерних систем на основі баз знань для підтримки диспетчерського керування електичними системами в умовах дефіциту часу та ресурсів. Висвітлено специфіку застосування продукційної форми подання знань, що базується на реалізації кон'юнктивно-диз'юнктивних логічних операцій. Розглянуто завдання побудови виробничих експертних систем на теоретичній основі апарату мереж Петрі, що дозволяє генерувати не-суперечливі логічні моделі прийняття рішень з урахуванням паралелізму. У роботі розглянуто завдання забезпечення якості нормальних та післяаварійних режимів електроенергетичної системи на основі використання евристичних методів ситуаційного управління та підтримки рішень диспетчера. Побудову бази знань запропоновано здійснювати на навчальних вибірках параметрів, отриманих відповідно до матриць планування факторних експериментів. У роботі запропоновано інтегральну модель представлення знань області диспетчерського управління на семантичних та продукційних мережах

*Результати роботи можуть бути використані як на вищому рівні диспетчерського управління, так і в районних електричних мережах під час планування протиаварійних заходів.*

*Ключові слова:* інтелектуальна система, продукція, евристика, диспетчеризація, паралелізм, база знань, експертна система, логічний висновок, формальна мова

**Постановка проблеми.** Стрімке зростання складності сучасних технологічних та соціально-економічних систем вимагає впровадження принципово нових підходів до прийняття управлінських рішень. Це зумовлено ієрархічною заплутаністю та складною логікою взаємодії компонентів об'єктів управління. Відтак, критичного значення набуває розробка формалізму, який би поєднував у собі адекватність моделювання, наочність та теоретичну глибину. Традиційні чисельні методи моделювання сьогодні втрачають актуальність через свою статичність та високу трудомісткість розробки. Зокрема, створення великих моделей може тривати роками, а будь-яка зміна структури об'єкта потребує повного перепроєктування ПЗ. Альтернативним шляхом є розбудова інтелектуальних баз знань для експертних систем, які здатні функціонувати в темпі реального часу та адаптуватися до паралельних ланцюгів подій без критичних витрат на перепроєктування. Проблема моделювання адекватного формалізму для прийняття рішень загострюється через ускладнення структурної ієрархії сучасних систем. Висока парамет-

рична розмірність та необхідність реагування в реальному часі роблять застосування класичних обчислювальних методів малоефективним. На противагу статичним чисельним моделям, розробка яких потребує значних інтелектуальних та часових ресурсів (3–5 люд./років), пропонується перехід до побудови гнучких баз знань. Такий підхід забезпечує необхідну повноту та несуперечливість опису процесів, враховуючи при цьому динаміку та одночасність багатьох подій у системі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних умовах різкого зростання збитків від помилкових управлінських рішень ці обставини стають критичними. Проведений аналіз показує, з одного боку, великий інтерес до проблеми побудови та використання баз знань, а, з іншого боку, – відсутність єдиних підходів і стійких детермінованих методик її вирішення. Видається, що таке рішення може бути знайдено на шляху об'єднання алгоритмічних підходів і відпрацьованих евристик. У даній ситуації ставиться завдання розробки та впровадження принципово нових підходів до опису та управління складними системами. Одним із можливих рішень є розробка евристичних підходів до представлення складних об'єктів та моделювання процесів прийняття управлінських рішень [1-3]. Основою таких підходів є застосування різних мов представлення знань у складі систем логічної обробки інформації, систем штучного інтелекту та, зокрема, експертних систем [1, 2]. Останні надають потужні засоби обробки експертної інформації та забезпечують можливість детального аналізу ситуації при значній економії обчислювальних ресурсів. Аналіз показує, що найбільш повними можливостями для представлення динаміки та логіки складних структур володіють продукційні системи представлення знань в експертних системах [4, 5]. Багато інших способів представлення знань мають обмеження, є складними для сприйняття та важкими в інструментальній реалізації. До таких методів можна віднести обчислення предикатів, динамічні спискові структури, триплети, семантичні мережі. Логіка предикатів, наприклад, не забезпечує моделювання розвинених структур даних. Спискові структури складні в програмній реалізації. На сьогоднішній день відсутній єдиний підхід до реалізації універсального засобу представлення експертних знань для різних професійних середовищ. Отже, потрібна розробка такого формального апарату представлення продукційних знань, який, спираючись на глибоку теоретичну базу, забезпечить ефективність рішень і простоту програмної реалізації. У статті розглянуто формальний апарат мереж Петрі, який відповідає вимогам представлення продукційних форм знань для їх програмної реалізації [6-9]. У роботах [10, 11] детально розглянуто прикладні аспекти моделювання та реалізації програмних моделей на основі формалізмів мереж Петрі.

**Виклад основного матеріалу.** Продукційні системи є найбільш раціональним засобом представлення знань у предметних областях, що характеризуються значною складністю та динамічністю функціонування об'єктів. Програмний комплекс для реалізації математичних моделей продукційних баз знань у задачах диспетчеризації енергосистем базується на багаторівневій архітектурі. Вона інтегрує підсистему збору даних (SCADA), базу продукційних правил, механізм логічного виведення в реальному часі та модуль пояснення прийнятих рішень. Математично цей процес описується як

відображення множини станів системи у множину керуючих дій, де виведення є послідовною активацією правил залежно від поточних параметрів мережі. Продукційний підхід забезпечує високу прозорість логіки, можливість інтерпретації результатів та легкість корекції бази знань. Слід зазначити, що більшість існуючих підходів до реалізації баз знань або є складними та незручними для сприйняття через особливості застосованого математичного апарату, або є складними для програмної реалізації.

Для відстеження спрацьовування правил та фіксації ланцюжків міркувань визначають мову мережі продукцій. Теорія формальних мов для аналізу рядків, що породжуються формальними системами, і, зокрема, мережами Петрі, широко використовується при моделюванні ситуаційного управління.

У роботі розглянуто реалізацію представлення продукційної частини бази знань на основі математичного апарату теорії мереж Петрі. Основні принципи побудови елементарних продукцій у термінах теорії мереж Петрі полягають у наступному.

Перш за все, з метою отримання необхідного змісту, що формується моделлю, вводяться дві умови:

жодна позиція продукції не може одночасно бути входом і виходом одного й того самого переходу,  $I(t_j) \cap O(t_j) = \emptyset$ ;

у продукціях фішки мають значення сигналу, тобто принципово важливим є сам факт наявності або відсутності фішок у позиціях.

Оскільки кількість фішок у вхідних позиціях продукцій не перевищує кількості продукцій, підключених до їхніх входів, то кількість фішок буде обмеженою. Отже, для будь-якого стану нереклексивної мережі продукцій

$$\forall(\mu' | \mu' \leq n) : \mu' \in R(P, \mu), \quad (1)$$

де  $n$  – кількість продукцій мережі;  $\mu'$  – деяке поточне маркування;  $R$  – множина продукцій на мережі Петрі;  $P$  – множина позицій продукційної мережі Петрі;  $\mu$  – множина можливих маркувань мережі.

Така мережа, як відомо, має властивість  $n$ -безпеки.

З огляду на наведені вище умови, запропоновано таку модель елементарної продукції в термінах теорії мереж Петрі:

$$r = \langle P_r, T_r, I_r, O_r \rangle, \quad (2)$$

де  $P_r = \{P^I, P^O, P^J\}$  – кінцева множина позицій продукції;  $P^I = \{p_i^I | i=1, N^I\}$  – кінцева множина вхідних позицій продукції,  $N^I$  – кількість вхідних позицій продукції,  $P^O = \{p_j^O | j=1, N^O\}$  – кінцева множина вихідних позицій продукції;  $N^O$  – кількість вихідних позицій продукції;  $P^J = \{p', p''\}$  – множина додаткових позицій продукції;  $T_r = \{t_k | k=1, N^T\}$  – кінцева множина переходів продукції,  $N^T$  – кількість переходів продукції;  $I_r$  – вхідна функція продукції, що відображає множину переходів продукції у множину її вхідних позицій,  $I_r: T_r \rightarrow P^I$ ;  $O_r$  – вихідна функція продукції, що відображає множину переходів продукції у множину її вихідних позицій,  $O_r: T_r \rightarrow P^O$ .

В продукції введені додаткові позиції  $p'$  і  $p''$ , які призначені для керування

спрацьовуванням продукції в одиничному циклі роботи мережі правил. Для забезпечення спрацьовування продукції в її додаткову позицію  $p'$  повинна бути розміщена фішка.

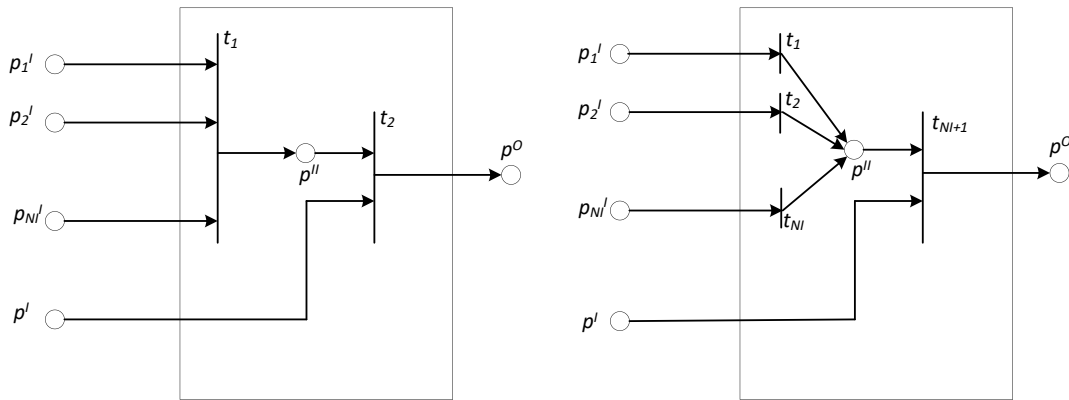


Рисунок 1 – Мережі Петрі, що відповідають таким продукціям:

а) продукція типу «AND», б) продукція типу «OR»

У логічній системі, що створюється, не розглядаються продукції типу «НЕ». Введення останньої до продукційної мережі призвело б до необхідності суворого дотримання порядку правил у базі знань, що суперечить принципу декларативності. Тому дія заперечення закладена в смисловий зміст інформації «AND» та «OR» продукцій.

Розширені вхідні та вихідні функції, наприклад, типу «AND», мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 I(t_1) &= \{p_1', \dots, p_{N'}'\}, \\
 I(t_2) &= \{p', p''\}, \\
 O(t_1) &= \{p''\}, \\
 O(t_2) &= \{p^o\}.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Виконання продукції здійснюється відповідно до правил функціонування мереж Петрі.

Нехай  $M^k = \{\mu_k^i\}$  – вектор усіх можливих позначень вхідних позицій правила,  $M^k \subset R(C, \mu)$ ,  $k=1, N^k$ ;  $N^k$  – загальна кількість можливих маркувань;  $\mu_k^i = \{\mu(p_k^i)\}$ ,  $\mu(p_k^i)$  – маркування  $i$ -ої вхідної позиції правила, включаючи й позицію  $p'$ ,  $i = 1, N^k + 1$ . Тоді умова спрацьовування  $k$ -ої продукції типу «AND» буде виглядати наступним чином:

$$\forall (r_k) \exists (\mu_k^i) (r_k \in R_C, \mu_k^i \in M^k) : \sum_{i=1}^{N^k} \mu(p_{ki}^i) + \mu(p_k') \geq N^k + 1, p_{ki}^i \in P_k^i,
 \tag{4}$$

де  $n_k$  –  $k$ -я продукція;  $\mu_k^i$  – маркування вхідних позицій  $k$ -ої продукції;  $R_C$  – множина продукцій;  $M^k$  – вектор усіх можливих позначень вхідних позицій  $k$ -ої продукції;  $\mu(p_k')$  – маркування додаткової позиції  $k$ -ої продукції;  $P_k^i$  – множина всіх вхідних позицій  $k$ -ої продукції,  $p_{ki}^i \in P_k^i$ .

Функція наступного стану, застосована до k-ої продукції «AND»-типа, відобразить маркування  $\mu_k^I$  в  $\mu_k^{I'}$ :

$$\mu_k^{I'} = \delta(\mu_k^I, r). \quad (5)$$

Якщо у вихідних позиціях продукції було по одній фішці, то в результаті вектор  $\mu_k^{I'}$  отримає всі нульові значення, а вектор  $\mu_k^{O'}$  матиме вигляд  $\mu_k^{O'} = \{\mu_{kj}^{O'}\}$ , де  $\forall \mu_{kj}^{O'}: \mu_{kj}^{O'} = 1, j = 1, N^O$ .

Введемо оціночні характеристики фішок у вихідних позиціях продукції типу «AND». Позначимо вагу кожної фішки у вихідних позиціях  $p_i^O$  через  $m_p^O$ . Тоді ця вага визначається через ваги фішок у вхідних позиціях  $m_p^I$  таким чином:

$$m_p^O = \prod_{i=1}^{N^I} m_{pi}^I. \quad (6)$$

Розглянемо мережу Петрі, що відповідає продукціям типу «OR». Умова спрацьовування k-ої продукції типу «OR» має вигляд:

$$\forall (r_k) \exists (\mu_k^I) (r_k \in R_C, \mu_k^I \in M_k^I): \sum_{i=1}^{N^I} \mu(p_{ki}^I) + \mu(p_k^I) \geq 2, p_{ki}^I \in P_k^I, \quad (7)$$

Розширені вхідна та вихідна функції в даному випадку мають вигляд:

$$\begin{aligned} I(t_1) &= \{p_1^I\}, \\ I(t_2) &= \{p_2^I\}, \\ &\dots\dots\dots \\ I(t_N) &= \{p_N^I\}, \\ I(t_{N+1}) &= \{p', p''\}, \\ O(t_1) &= O(t_2) = \dots = O(t_{N'}) = \{p''\}, \\ O(t_{N'+1}) &= \{p^O\}. \end{aligned} \quad (8)$$

Функція наступного стану, застосована до правила «OR», також відобразить вектори маркерів вхідних і вихідних позицій у нових станах:

$$\begin{aligned} \mu^{I'} &= \delta(\mu^I, r), \\ \mu^{O'} &= \delta(\mu^O, r), \\ \mu^{I'} &= \{\mu'(p_i^I)\}, \mu'(p_i^I) = 0, i = 1, N^I, \\ \mu^{O'} &= \{\mu'(p_j^O)\}, \mu'(p_j^O) = 1, j = 1, N^O. \end{aligned} \quad (9)$$

Останні вирази ілюструють умови функціонування «OR»-продукції. Остання вважається спрацьованою, якщо спрацював принаймні один із її дозволених переходів. Введемо для правила типу «OR» оціночні характеристики фішок у вихідних позиціях. Зберігаючи прийняті позначення, отримаємо:

$$m_p^O = 1 - \prod_{i=1}^{N^I} (1 - m_{pi}^I). \quad (10)$$

Зазначимо, що застосований підхід до визначення ваг фішок у вихідних позиціях продукції відображає імовірнісні властивості сигналів, що проходять через модельовану мережу. Отже, при асоціюванні фішок у позиціях мережі з певними обсягами інформації реалізується можливість відображення недетермінованості експертних знань. Формування мережі продукцій ґрунтується на принципах поєднання вихідних позицій одних продукцій із вхідними позиціями інших. Нехай  $P_a = \{p_{a1}, \dots, p_{an}\}$  и  $P_b = \{p_{b1}, \dots, p_{bm}\}$  – дві об'єднані множини позицій. Кожна позиція з  $P_a$  копіюється  $m$  раз, а кожна позиція з  $P_b$  –  $n$  раз. Позиції копіюються разом із їхнім маркуванням та інцидентними дугами. Потім кожна пара позицій  $(p_{ai}, p_{bj})$  замінюється новою позицією  $p = p_{ai} \cup p_{bj}$  з маркуванням  $\mu(p) = \mu(p_{ai}) + \mu(p_{bj})$  і відповідними інцидентними дугами. Наведено приклад застосування описаного прийому на рис. 2.

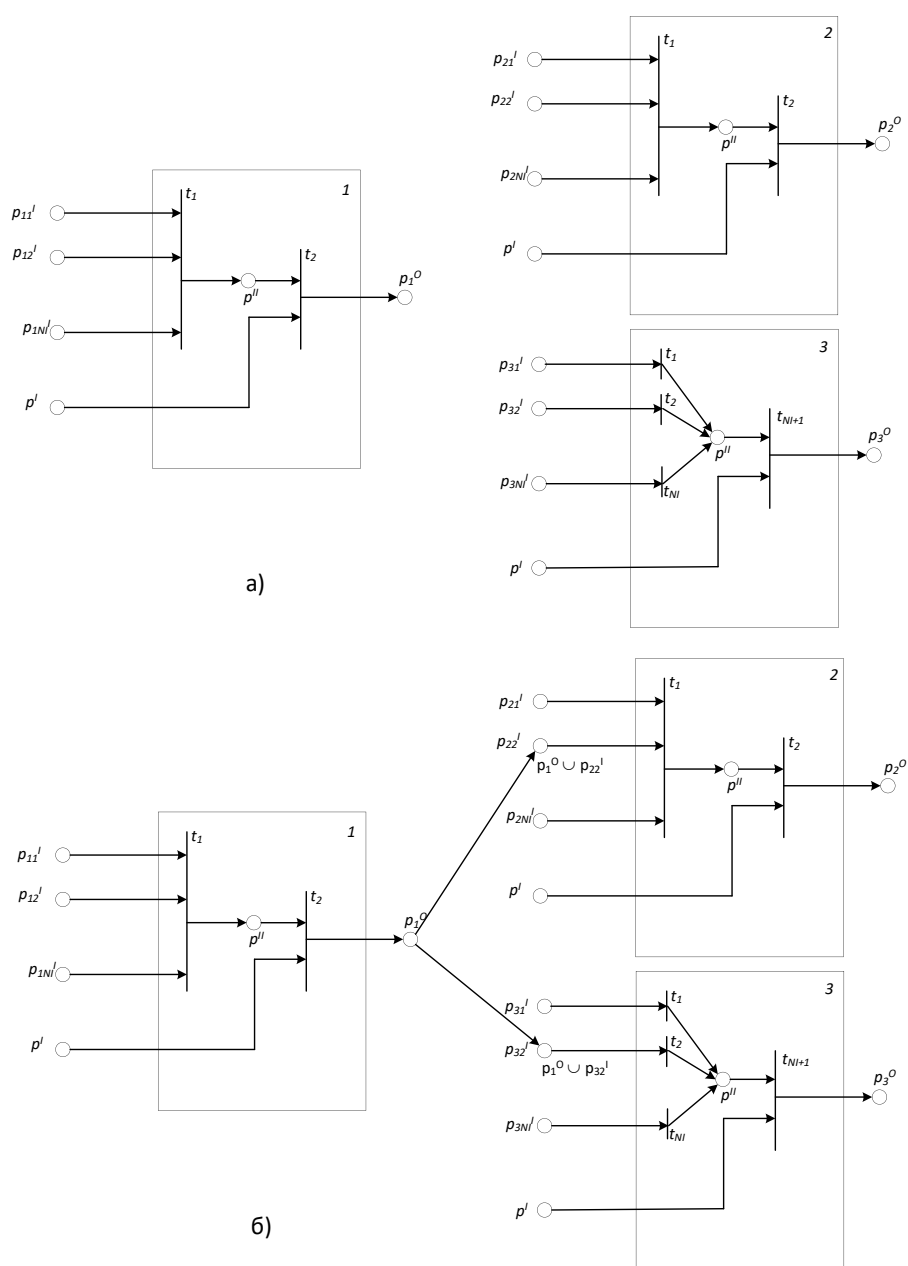


Рисунок 2 – Злиття позицій правил мережі

Зазначимо, що прийняте тлумачення значення та ролі додаткових позицій продукцій виділяє їх із процесу злиття. Перед початком нового циклу роботи системи у всі додаткові позиції  $p'$  розміщується по одній фішці. У разі необхідності повторної ініціалізації одного або групи правил заново ініціюються їхні вхідні позиції. У мережі, що складається з таких продукцій, спрацьовують усі правила, які можуть спрацювати, чим забезпечується паралелізм функціонування продукцій та їхня адекватність модельованим процесам. Злиття позицій продукцій відповідає операції конкатенації в мережі Петрі. Кожна продукція, у загальному випадку, є мережею Петрі зі своєю мовою, отже, мова мережі продукцій

$$L_1 \dots L_N = \{X_1, \dots, X_N \mid X_1 \in L_1, \dots, X_N \in L_N\}, \quad (11)$$

що є конкатенацією мов  $L_1 \dots L_N$ , також є мовою мережі Петрі.

Узагальнюючи сказане, можна формально визначити мережу продукцій, побудовану на основі мережі Петрі. Під мережею продукцій у контексті даної роботи мається на увазі така модель:

$$R_C = \langle R, I_r, O_r \rangle, \quad (12)$$

де  $R_C = \{r_1, \dots, r_N\}$  – кінцева множина продукцій мережі;  $I_r: R \rightarrow P_C^I$  – вхідна функція, що відображає множину продукцій у множину вхідних позицій;  $O_r: R \rightarrow P_C^O$  – вихідна функція, що відображає множину продукцій у множину вихідних позицій.

Очевидно, що під множинами вхідних і вихідних позицій тут слід розуміти

$$P_C^I = \bigcup_{i=1}^{N_r} p_i^I, \quad (13)$$

$$P_C^O = \bigcup_{j=1}^{N_r} p_j^O,$$

де  $P_C^I, P_C^O$  – відповідно до множини вхідних і вихідних позицій продукцій, об'єднаних у мережу.

Для мережі продукцій виконується умова

$$\forall(r)(P_r^I \cap P_c^I \neq \emptyset \vee P_r^O \cap P_c^O \neq \emptyset), \quad (14)$$

що визначає зв'язність мережі.

Розглянемо, наприклад, мережу правил, зображену на рис. 2. У цьому випадку виконуються співвідношення:

$$R = \{r_1, r_2, r_3\},$$

$$I(r_1) = (p_{11}^I, p_{12}^I), O(r_1) = (p_{22}^I, p_{31}^I),$$

$$I(r_2) = (p_{21}^I, p_{22}^I), O(r_2) = (p_2^O),$$

$$I(r_3) = (p_{31}^I, p_{32}^I), O(r_3) = (p_3^O), \quad (15)$$

$$P_C^I = \{p_{11}^I, p_{12}^I, p_{21}^I, p_{22}^I, p_{31}^I, p_{32}^I\},$$

$$P_C^O = \{p_{22}^I, p_{31}^I, p_2^O, p_3^O\}.$$

Таким чином, модель мережі, побудована на запропонованих принципах, може відображати процеси, що характеризуються високим ступенем паралелізму. Остання

обставина є вкрай необхідною під час машинного аналізу бази знань диспетчера, прийняття рішень яким пов'язане з оцінкою значної кількості одночасних, рівнозначних і взаємопов'язаних факторів. Для подібних процесів можливе встановлення відносин паралелізму та послідовності:

$$\begin{aligned} XcoY &\Leftrightarrow (\neg(X < Y) \wedge \neg(Y < X)) \vee (X = Y), \\ XliY &\Leftrightarrow ((X < Y) \vee (Y < X)) \vee (X = Y), \end{aligned} \quad (16)$$

де  $co$  і  $li$  – відповідно, відносини паралелізму та наслідування;  $X, Y$  – елементи процесу (продукції та зміни маркування позицій);  $<$  – відношення передування;  $=$  – відношення одночасності. Відношення  $co$  не накладає обмежень на порядок розташування елементів і не встановлює причинно-наслідкових зв'язків між ними.

Як зазначалося вище, кількість фішок у вхідних позиціях продукцій обмежена кількістю продукцій, приєднаних до них зліва, кількість яких не перевищує певної величини  $n$ . Кількість фішок у позиції  $p$  продукції «OR»-типа може накопичуватися і досягати максимального значення

$$n_{max} = n_c(n_p - 1), \quad (17)$$

де  $n_p$  - загальна кількість вхідних позицій «OR»-продукції;  $n$  – кількість циклів запуску даної продукції. У загальному випадку величина  $n$  є скінченною, і справедливо

$$\forall(p_i | p_i \in P_c): \mu(p_i) \leq n_{max}, \quad (18)$$

т.е. мережа має властивість  $n_{max}$ - обмеженості і, отже,,  $n_{max}$ - безпеки.

Задача досяжності для всіх вихідних позицій зводиться до з'ясування питання спрацьовування правил і зумовлена структурою мережі правил та їхнім поточним маркуванням.

**Результати та обговорення.** З розглянутих властивостей побудованих математичних моделей продукцій впливає, що мережі Петрі є потужним засобом для представлення знань про продукцію. Апарат мереж Петрі дозволяє адекватно відобразити паралелізм ланцюгів подій, характерний для сфери диспетчерського управління енергооб'єднанням. Розроблені моделі не накладають обмежень на вихідну форму представлення диспетчерської інформації. Введені принципи інтерпретації маркувань позицій дозволяють вирішувати проблеми конфлікту продукцій і проводити чисельну оцінку достовірності отриманих логічних рішень. Визначення мови мережі продукцій дає можливість трасування та аналізу ланцюжків міркувань, а також полегшує процес створення та верифікації бази знань з метою ліквідації внутрішньої суперечливості.

На основі запропонованих підходів і моделей розроблено експертну систему оцінки параметрів компонентів електроенергетичної системи. На рис. 3 наведено фрагмент форми програмного комплексу з диспетчерськими рекомендаціями щодо автоматизації процесу диспетчеризації режимів енергосистем та ліквідації аварійних станів.

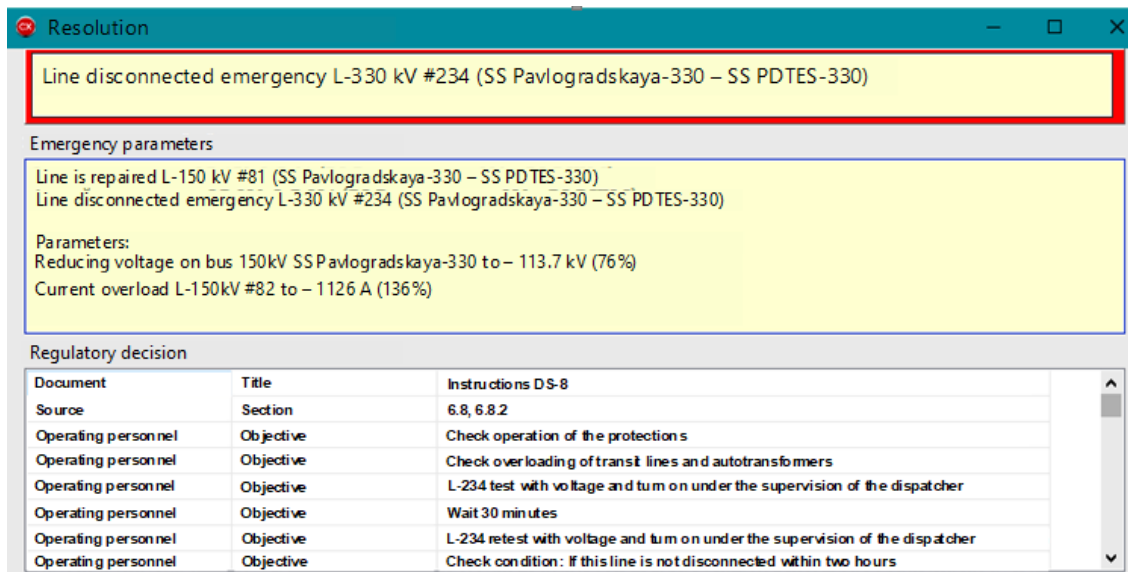


Рисунок 3 – Експертні рекомендації щодо диспетчерського врегулювання аварійної ситуації в енергосистемі

Архітектура програмної реалізації продукційних моделей для диспетчерського управління охоплює рівні збору інформації, зберігання знань та оперативного виведення рішень з можливістю їх пояснення. Формалізація правил як відображень стану системи на керуючі впливи дозволяє реалізувати динамічний процес прийняття рішень у реальному часі.

**Висновки.** Результати роботи демонструють, що мережі Петрі є ефективним засобом програмної реалізації ситуаційних моделей. Розглянутий підхід до синтезу правил не потребує попередньої формалізації знань, що значно спрощує роботу з експертною інформацією. Наявність потужної теоретичної бази дозволяє здійснювати глибокий аналіз множини станів системи. Дослідження можливостей побудови продукційних мереж на основі математичного апарату мереж Петрі та їх програмної реалізації підтверджує, що цей підхід є універсальним інструментом для моделювання ситуаційних задач. В статті обґрунтовано роль інтелектуальних комп'ютерних систем у підвищенні ефективності управлінських процесів та скороченні циклу прийняття рішень. Модель продукцій на базі мереж Петрі дає можливість повторного використання розроблених компонентів значно пришвидшує створення нових додатків. Практичне впровадження результатів дослідження в контур управління енергооб'єктів дозволить забезпечити високу якість прийняття рішень та мінімізувати негативні наслідки виробничих аварій. Використання продукційного формалізму забезпечує адаптивність бази знань до змін у конфігурації енергосистеми та високу зрозумілість логіки управління для оперативного персоналу. Запропонований метод синтезу структури правил дозволяє використовувати експертну інформацію в її вихідному вигляді без необхідності попередньої складної формалізації. Подальші розвідки будуть спрямовані на апробацію цих моделей у різних предметних областях з урахуванням специфічних експлуатаційних обмежень.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Sai T. K., Reddy K. A. New Rules Generation From Measurement Data Using an Expert System in a Power Station. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2015. Vol. 30, no. 1. P. 167–173. DOI: 10.1109/tpwrd.2014.2355595
2. Santos, J. K. S. d., Siqueira, L. S., Faria, E. M. B., Bispo, K. A., Silva, G. J. F. d., & Soares, M. S. Methodological Advances in Expert Systems with Artificial Intelligence. *Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação, Brasil*. 2025. P. 703–712. DOI: 10.5753/sbsi.2025.246618
3. Elsharif Karrar A.E. A Proposed Model for Improving the Performance of Knowledge Bases in Real-World Applications by Extracting Semantic Information. (*IJACSA*) *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2022. Vol. 13, No. 2. P. 116-123. DOI: 10.14569/IJACSA.2022.0130214
4. Anamitra Kanjilal. Knowledge Representation in Artificial Intelligence. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 4. P. 2227–2238. URL: <https://www.ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/6577>
5. Jiang H., Gai J., Zhao S., Chaudhry P. E., Chaudhry S. S. Applications and development of artificial intelligence system from the perspective of system science: A bibliometric review. *Systems Research and Behavioral Science*. 2022. DOI: 10.1002/sres.2865
6. Cardoso J., Valette R. Petri nets. 2024. 197 p. DOI: 10.34849/t30e-ax86
7. Kumbhar V.B., Chavan M.S. A Review of Petri Net Tools and Recommendations. *Advances in Computer Science Research*. Dordrecht, 2023. P. 710–721. DOI: 10.2991/978-94-6463-136-4\_61
8. Bernardinello L., Petrucci L. *Application and Theory of Petri Nets and Concurrency*. Cham: Springer International Publishing, 2022. DOI: 10.1007/978-3-031-06653-5.
9. Truong V.-D., Brace W., Benzoni G., Cammi A., Kuosmanen P. A probabilistic-driven approach for early design quality risk and crux identification using non-Markovian stochastic Petri nets. *Research in Engineering Design*. 2025. Vol. 37, no. 1. DOI: 10.1007/s00163-025-00466-w
10. Reckell T., Sterner B., Jevtić P. The Basic Reproduction Number for Petri Net Models: A Next-Generation Matrix Approach. *Applied Sciences*. 2025. Vol. 15, no. 23. P. 12827. DOI: 10.3390/app152312827
11. Hammedi S., Elmelliani J., Nabli L., Namoun A., Alanazi M. H., Aljohani N., Shili M., Alshmrany S. Optimizing Production in Reconfigurable Manufacturing Systems with Artificial Intelligence and Petri Nets. *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*. 2024. Vol. 15, no. 10. DOI: 10.14569/ijacsa.2024.0151044

**REFERENCES**

1. Sai, T. K., & Reddy, K. A. (2015). New Rules Generation From Measurement Data Using an Expert System in a Power Station. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 30(1), 167–173. DOI: 10.1109/tpwrd.2014.2355595
2. Santos, J. K. S. d., Siqueira, L. S., Faria, E. M. B., Bispo, K. A., Silva, G. J. F. d., & Soares, M. S. (2025). Methodological Advances in Expert Systems with Artificial Intelligence. In

Simpósio Brasileiro de Sistemas de Informação, 703–712. DOI: 10.5753/sbsi.2025.246618

3. Elsharif Karrar A.E. (2022). A Proposed Model for Improving the Performance of Knowledge Bases in Real-World Applications by Extracting Semantic Information. (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 13(2), 116-123. DOI: 10.14569/IJACSA.2022.0130214

4. Anamitra Kanjilal. (2024). Knowledge Representation in Artificial Intelligence. International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering, 12(4), 2227–2238. URL: <https://www.ijisae.org/index.php/IJISAE/article/view/6577>

5. Jiang, H., Gai, J., Zhao, S., Chaudhry, P. E., & Chaudhry, S. S. (2022). Applications and development of artificial intelligence system from the perspective of system science: A bibliometric review. Systems Research and Behavioral Science, 39(3), 361-378. DOI: 10.1002/sres.2865

6. Cardoso J., & Valette, R. (2024) Petri nets. 197 p. DOI: 10.34849/t30e-ax86

7. Kumbhar, V. B., & Chavan, M. S. (2023). A Review of Petri Net Tools and Recommendations. In Advances in Computer Science Research, Atlantis Press International BV. 710–721. DOI: 10.2991/978-94-6463-136-4\_61

8. Bernardinello, L., & Petrucci, L. (2022). Application and Theory of Petri Nets and Concurrency. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-031-06653-5

9. Truong, V.-D., Brace, W., Benzoni, G., Cammi, A., & Kuosmanen, P. (2025). A probabilistic-driven approach for early design quality risk and crux identification using non-Markovian stochastic Petri nets. Research in Engineering Design, 37(1). DOI: 10.1007/s00163-025-00466-w

10. Reckell, T., Sterner, B., & Jevtić, P. (2025). The Basic Reproduction Number for Petri Net Models: A Next-Generation Matrix Approach. Applied Sciences, 15(23), 12827. DOI: 10.3390/app152312827

11. Hammedi, S., Elmelliani, J., Nabli, L., Namoun, A., Alanazi, M. H., Aljohani, N., Shili, M., & Alshmrany, S. (2024). Optimizing Production in Reconfigurable Manufacturing Systems with Artificial Intelligence and Petri Nets. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 15(10). DOI: 10.14569/ijacsa.2024.0151044

Received 23.04.2026.

Accepted 27.04.2026.

Published 30.04.2026

### ***Software implementation of mathematical models***

#### ***for production-rule knowledge bases in power system dispatch control***

*This paper analyzes approaches to knowledge-base-driven intelligent information computer systems designed to support the dispatch control of electric power systems under time and resource constraints. Significant results were obtained through concepts of situational management, simulation modeling, and heuristic analysis, as well as the application of pattern recognition methods. The core idea for solving the problem of ensuring power system mode quality is that the bulk of the initial topology and state data is pre-processed, while the direct control actions are determined using relatively simple algorithms based on data concerning the previous normal state and the vector of disturbance parameters.*

*Success in solving power system mode control tasks is largely determined by the representativeness of the mode-quality characteristic parameters.*

*Thus, the search for optimal control actions entails solving the following tasks: recognition and classification of emergency situations; determination of the locations and types of control actions depending on the specific emergency context; and determination of the dosage of dispatch control actions.*

*The study highlights the specific application of the production-rule form of knowledge representation, which is based on the implementation of conjunctive-disjunctive logical operations. The task of building production-rule expert systems is considered on the theoretical basis of Petri nets, which enables the generation of consistent logical decision-making models while accounting for parallelism. The paper examines the task of ensuring the quality of the electric power system in both normal and post-emergency modes by utilizing heuristic methods for situational management and dispatcher decision support. It is proposed to construct the knowledge base using parameter training sets generated according to factorial design matrices. The study proposes an integrated knowledge representation model for the dispatch control domain based on semantic and production networks.*

*The research results can be utilized both at the higher level of dispatch control and in regional power grids during the planning of emergency control measures.*

*Keywords: intelligent system, production rule, heuristics, dispatch control, parallelism, knowledge base, expert system, logical inference, formal language.*

**Котов Ігор Анатолійович** - доктор технічних наук, доцент, професор кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2445-6259>

**Швец Дмитро Валерійович** - кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5126-6405>

**Карабут Надія Олександрівна** - старший викладач кафедри моделювання та програмного забезпечення, Криворізький національний університет.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2327-4595>

**Kotov Ihor Anatoliyovych** - Doctor of Sciences, Professor of the Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2445-6259>

**Shvets Dmytro Valeriyovych** - Ph.D., Associate Professor of the Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5126-6405>

**Karabut Nadiya Oleksandrivna** - Senior Lecturer, Modeling and Software Department, Kryvyi Rih National University.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2327-4595>.

М.М. Нестеренко, Т.М. Нестеренко, І.Г.Пімінов, А.І.Аніщенко

**ДОСЛІДЖЕННЯ КУТА ВСТАНОВЛЕННЯ ЛОПАТОК ЗМІШУВАЧА  
ПРИМУСОВОЇ ДІЇ З ВЕРТИКАЛЬНИМ ВАЛОМ  
У СИСТЕМІ «ЗМІШУВАЧ — БЕТОНОНАСОС»**

*Анотація. У статті розглянуто вплив кута встановлення лопаток змішувача примусової дії з вертикальним валом на процес перемішування бетонної суміші в технологічній системі «змішувач — бетононасос». Побудовано комп'ютерну модель змішувача в програмному комплексі SOLIDWORKS, що дало змогу дослідити рух суміші в робочій камері, оцінити розподіл швидкостей частинок та визначити зони недостатнього або надмірного перемішування. Як досліджуване середовище прийнято полістиролбетонну суміш D400 класу міцності B1,0, а швидкість руху лопаток під час моделювання становила 0,66 м/с. Розглянуто роботу звичайної лопатки шириною 100 мм при кутах встановлення 20° і 10°, а також кілька варіантів модернізованої вертикальної лопатки, зокрема конструкцію у вигляді «сапожка», лопатку з трикутним вирізом і лопатку з додатковими вікнами. Встановлено, що при куті встановлення звичайної лопатки 20° максимальна швидкість руху частинок суміші досягає 1,65 м/с, що може спричиняти надмірну інтенсивність перемішування в окремих зонах, тоді як зменшення кута до 10° забезпечує зниження максимальної швидкості до 0,7 м/с і більш рівномірний рух матеріалу. Показано, що вдосконалена вертикальна лопатка з вирізаними вікнами при куті встановлення 10° забезпечує збалансований режим перемішування з максимальною швидкістю близько 0,84 м/с та рівномірною циркуляцією суміші в об'ємі камери. Одержані результати можуть бути використані для обґрунтування раціонального кута встановлення лопаток, удосконалення конструкції змішувачів примусової дії з вертикальним валом, підвищення однорідності бетонної суміші та забезпечення її стабільної подачі бетононасосом.*

*Ключові слова: змішувач примусової дії, вертикальний вал, кут встановлення лопаток, бетонна суміш, полістиролбетон, бетононасос, комп'ютерне моделювання, розподіл швидкостей, однорідність суміші, лопатка, перемішування.*

**Постановка проблеми.** У технологіях приготування та подачі бетонних сумішей важливе значення має забезпечення їх однорідності, стабільної рухливості та придатності до подальшого транспортування бетононасосом, оскільки нерівномірний розподіл компонентів, утворення застійних зон або надмірне перемішування можуть погіршувати якість суміші й ускладнювати її перекачування. Для змішувачів примусової дії з вертикальним валом одним із визначальних конструктивних параметрів є кут встановлення лопаток, від якого залежить напрям руху матеріалу, інтенсивність циркуляційних

потоків, рівномірність розподілу компонентів та енерговитрати процесу. У зв'язку з цим актуальним є дослідження впливу кута встановлення лопаток із використанням комп'ютерного моделювання, що дозволяє оцінити розподіл швидкостей суміші в робочій камері, виявити зони недостатнього перемішування та обґрунтувати параметри змішувача, ефективно поєднаного з бетононасосом для безперервного приготування і подачі бетонної суміші.

**Аналіз останніх досліджень.** У сучасних дослідженнях змішувального обладнання значна увага приділяється впливу конструктивних параметрів робочих органів на інтенсивність перемішування, рівномірність розподілу компонентів і енергетичну ефективність процесу. У роботі [1] досліджено вплив параметрів конструкції лопатевого змішувача на його продуктивність із використанням методу дискретних елементів, що підтверджує доцільність застосування комп'ютерного моделювання для аналізу руху матеріалу в робочій камері. Подібний підхід реалізовано в праці [5], де на основі DEM-моделювання прогнозовано час перемішування частинок у чотирилопатовому змішувачі, що є важливим для оцінювання ефективності різних конфігурацій лопаток.

Особливе значення для дослідження змішувачів примусової дії з вертикальним валом мають роботи, присвячені формуванню потоків матеріалу в лопатевих системах. У праці [2] проаналізовано динаміку зернистого середовища у вертикальному лопатовому змішувачі та встановлено особливості формування вторинних потоків, які впливають на рівномірність перемішування по висоті й радіусу змішувальної камери. У дослідженні [3] визначено параметри руху сипкого середовища в змішувачі з використанням методу дискретних елементів, що дозволяє оцінити напрямки переміщення матеріалу, швидкості частинок і можливі зони недостатнього перемішування.

Окремий напрям становлять дослідження властивостей бетонних сумішей залежно від режимів перемішування. У роботі [4] показано, що тривалість і швидкість перемішування істотно впливають на реологічні властивості, зручність укладання та механічні характеристики самоущільнювальних бетонів. Це має безпосереднє значення для систем, у яких змішувач поєднується з бетононасосом, оскільки суміш після приготування повинна не лише бути однорідною, а й зберігати стабільну рухливість і придатність до перекачування.

Енергетичні аспекти приготування будівельних сумішей розглянуто в роботі [6], де запропоновано загальні критерії оцінювання енергоефективності процесу. Це є важливим для обґрунтування кута встановлення лопаток, оскільки надмірна інтенсивність перемішування може збільшувати енергоспоживання без істотного покращення якості суміші. Водночас недостатній кут або нераціональна геометрія лопаток можуть призводити до утворення застійних зон і збільшення часу перемішування.

Безпосередньо вплив геометрії змішувача, лопаток і реологічних властивостей бетонної суміші розглянуто у працях [7, 8]. У цих роботах показано, що форма та розташування робочих органів визначають характер циркуляційних потоків, інтенсивність переміщення компонентів і якість готової бетонної суміші. У роботі [9] досліджено вплив геометрії лопатевого змішувача на турбулентність та інтенсивність перемішу-

вання рідких середовищ, що також підтверджує важливість конструктивної оптимізації робочих органів.

**Мета досліджень.** Метою досліджень є обґрунтування раціонального кута встановлення лопаток змішувача примусової дії з вертикальним валом на основі комп'ютерного моделювання руху бетонної суміші в робочій камері, з урахуванням впливу геометрії лопаток на інтенсивність перемішування, розподіл швидкостей, формування циркуляційних потоків і виникнення зон недостатнього або надмірного перемішування, а також забезпечення стабільної однорідності суміші для її подальшої подачі бетононасосом.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Для дослідження впливу кута встановлення лопаток на процес перемішування було розглянуто змішувач примусової дії з вертикальним валом, який працює у складі технологічної системи приготування та подачі бетонної суміші (рисунок 1). Такий підхід є важливим, оскільки змішувач у поєднанні з бетононасосом повинен забезпечувати не лише однорідне перемішування компонентів, а й стабільну рухливість суміші, придатну для подальшого транспортування по напірній магістралі. Недостатня якість перемішування може призводити до утворення неоднорідних зон, локального накопичення заповнювача, погіршення реологічних властивостей суміші та ускладнення її подачі бетононасосом.

У межах дослідження вивчався вплив кута встановлення лопаток змішувача примусової дії на характер руху суміші в робочій камері. Для цього було використано технологію тривимірного комп'ютерного моделювання в програмному комплексі SOLIDWORKS. Створена 3D-модель установки, у якій поєднано змішувач та бетононасос, дала змогу дослідити конструкцію робочих органів, напрямки переміщення суміші та розподіл швидкостей у змішувальній камері. Вихідні матеріали моделювання взято із завантаженого файлу, де наведено конструкцію установки, параметри суміші та результати моделювання для різних варіантів лопаток.

Під час моделювання швидкість руху лопаток бетонозмішувача становила 0,66 м/с. Як досліджуване середовище було задано параметри суміші полістиролбетону D400, де цифровий індекс відповідає масі одного кубічного метра матеріалу в кілограмах, тобто  $\text{кг/м}^3$ . Клас міцності на стискання прийнято В 1,0. Вибір такої суміші пояснюється тим, що полістиролбетон має виражену неоднорідність компонентного складу, містить легкий заповнювач і потребує обережного, але достатньо інтенсивного перемішування для забезпечення стабільних властивостей.

Для спрощення розрахункової схеми було побудовано модель змішувальної камери з основними робочими органами. Конструкція містить корпус змішувача, дві лопатки, які спрямовують потік суміші з dna корпусу, одну вертикальну лопатку, що переміщує розчин від внутрішньої стінки до центральної зони, а також центробіжну вертикальну крильчатку. Таке компонування забезпечує формування циркуляційних потоків у різних зонах камери та сприяє переміщенню матеріалу як у радіальному, так і у вертикальному напрямках.



Рисунок 1 – 3D модель установки, в якій поєднано змішувач та бетононасос

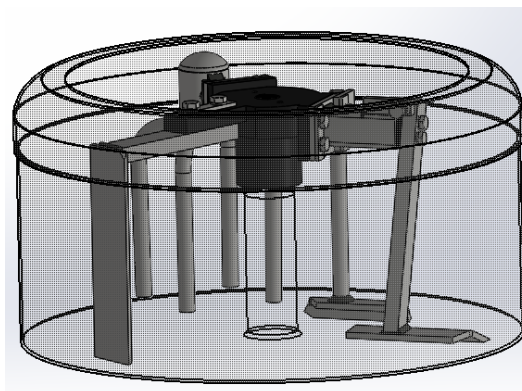


Рисунок 2 – Спрощена конструкція моделі змішувача

Основну увагу під час моделювання було приділено лопатці, яка відкидає потік суміші від внутрішнього корпусу змішувача. Саме ця лопатка значною мірою визначає напрямок переміщення матеріалу, інтенсивність циркуляції та рівномірність розподілу компонентів у камері. У процесі дослідження було промодельовано кілька варіантів лопаток із різною геометрією та кутом встановлення.

На першому етапі розглянуто звичайну лопатку шириною 100 мм, встановлену під кутом  $20^\circ$ . Такий варіант дозволив оцінити базовий характер руху суміші в робочій камері та визначити зони з підвищеними швидкостями.

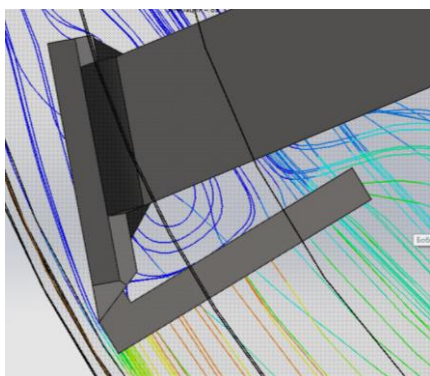


Рисунок 3 – Кут лопатки  $200^\circ$

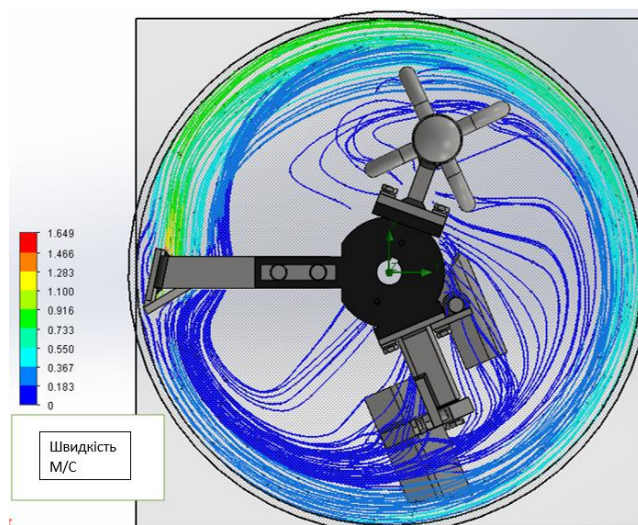


Рисунок 4 – Розподіл швидкості руху суміші в корпусі змішувача при звичайній лопатці, ширина 100 мм. Кут  $20^\circ$

Аналіз діаграми швидкостей показав, що при ширині лопатки 100 мм і куті встановлення  $20^\circ$  максимальна швидкість руху частинок суміші становить приблизно 1,65 м/с. Такий режим забезпечує інтенсивне переміщення матеріалу, однак надмірне зростання швидкості може спричинити нерівномірний розподіл компонентів у робочому об'ємі. Крім того, за надмірної інтенсивності руху можливе локальне перевантажен-

ня окремих зон змішувальної камери, що збільшує ризик зношування робочих органів і не завжди позитивно впливає на якість готової суміші.

На наступному етапі було досліджено звичайну лопатку тієї самої ширини 100 мм, але з кутом встановлення  $10^\circ$ . Метою цього етапу було зменшення надмірної інтенсивності потоку та оцінювання можливості формування більш рівномірного розподілу швидкостей у камері.

За результатами моделювання встановлено, що при куті встановлення  $10^\circ$  максимальна швидкість руху частинок суміші зменшується до 0,7 м/с. Такий режим є більш сприятливим для перемішування полістиролбетонної суміші, оскільки забезпечує менш різкі перепади швидкостей і знижує ймовірність надмірного переміщення окремих компонентів. У цій моделі спостерігається кращий характер перемішування суміші порівняно з варіантом кута  $20^\circ$ .

Разом з тим аналіз просторової діаграми показав, що переміщення розчину в змішувальній камері залишається нерівномірним по висоті.

Окремі зони мають нижчу інтенсивність руху, що може погіршувати рівномірність розподілу компонентів у всьому об'ємі. Для усунення цього недоліку було запропоновано вдосконалити вертикальну лопатку, надавши їй форму, яка забезпечує активніше переміщення матеріалу по висоті камери.

Наступним етапом моделювання стало створення конструкції лопатки у вигляді так званого «сапожка». Така форма передбачає зміну нижньої частини вертикальної лопатки з метою покращення захоплення матеріалу та його переміщення в робочій зоні. Очікувалося, що модернізована геометрія забезпечить активніше залучення суміші з нижньої частини бункера та зменшить імовірність утворення застійних зон.

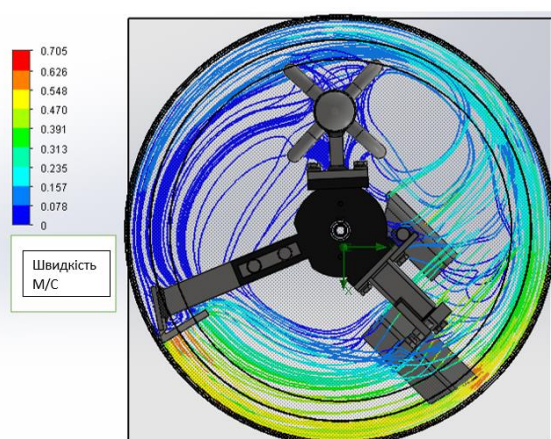


Рисунок 5 – Розподіл швидкості руху суміші в корпусі змішувача при звичайній лопатці, ширина 100 мм. Кут  $10^\circ$

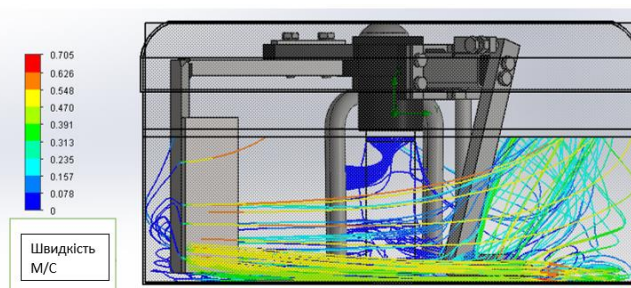


Рисунок 6 – Просторова діаграма розподілу швидкості руху суміші в корпусі змішувача при звичайній лопатці, ширина 100 мм. Кут  $10^\circ$

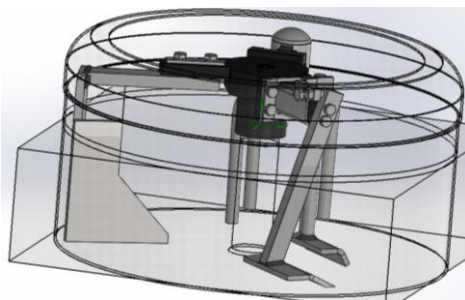


Рисунок 7 – Конструкція моделі змішувача з вдосконаленою вертикальною лопаткою

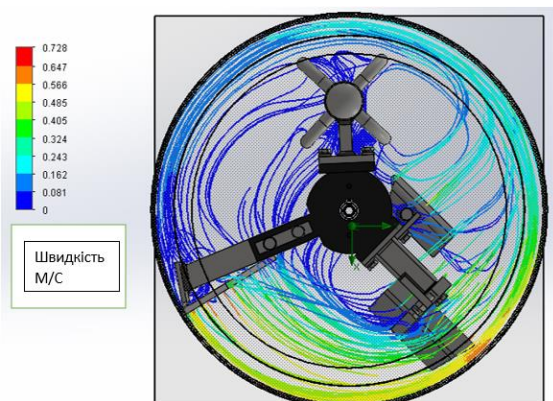


Рисунок 8 – Діаграма розподілу швидкості руху суміші в корпусі змішувача при модернізованій лопатці. Кут 100

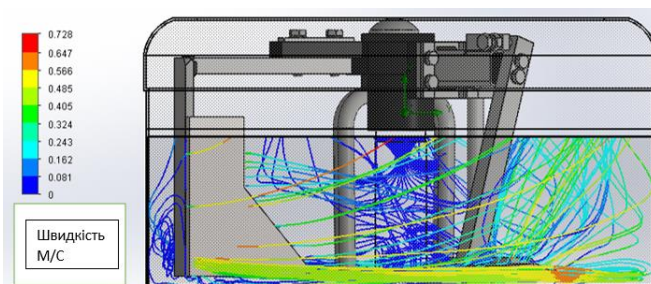


Рисунок 9 – Просторова діаграма розподілу швидкості руху суміші в корпусі змішувача при модернізованій лопатці. Кут 10°

З іншого боку, надмірна швидкість у нижній частині може призводити до локального перевантаження робочих органів, підвищеного зношування поверхонь і нерівномірного розподілу енергії перемішування.

Для зменшення надмірної швидкості в нижній частині робочої камери на наступному етапі було виконано виріз трикутної форми в нижній частині модернізованої вертикальної лопатки. Такий конструктивний елемент мав зменшити опір руху матеріалу, частково пропускати потік через лопатку та сприяти більш рівномірному розподілу швидкостей по висоті.

З діаграми швидкостей, наведеної на рисунку 8, видно, що при модернізованій лопатці та куті встановлення 10° максимальна швидкість руху частинок суміші становить приблизно 0,73 м/с. Порівняно зі звичайною лопаткою за того самого кута спостерігається незначне зростання максимальної швидкості, однак при цьому покращується характер перемішування по всьому об'єму змішувача. Це свідчить про те, що модернізована лопатка активніше залучає суміш до циркуляційного руху. Водночас було встановлено, що при використанні лопатки у вигляді «сапожка» спостерігається зростання швидкості в нижній частині бункера змішувача. Такий ефект може бути як позитивним, так і небажаним. З одного боку, він зменшує ризик утворення застійної зони біля дна.

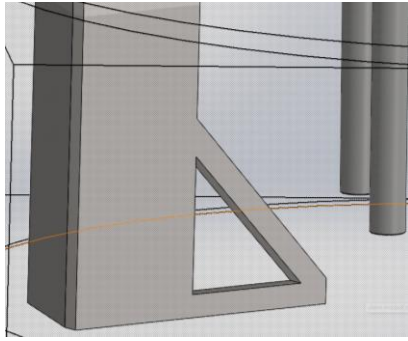


Рисунок 10 – Конструкція моделі змішувача з вдосконаленою вертикальною лопаткою з вирізаним вікном трикутної форми в нижній частині

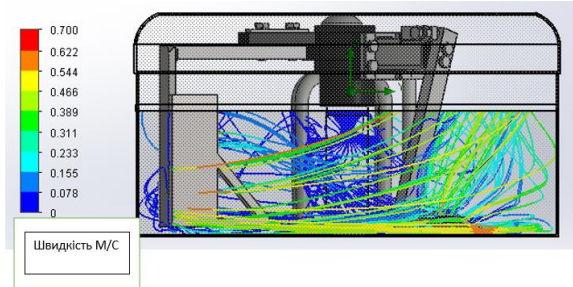


Рисунок 11 – Просторова діаграма розподілу швидкості руху суміші в корпусі змішувача з вдосконаленою вертикальною лопаткою з вирізаним вікном трикутної форми в нижній частині. Кут  $10^\circ$

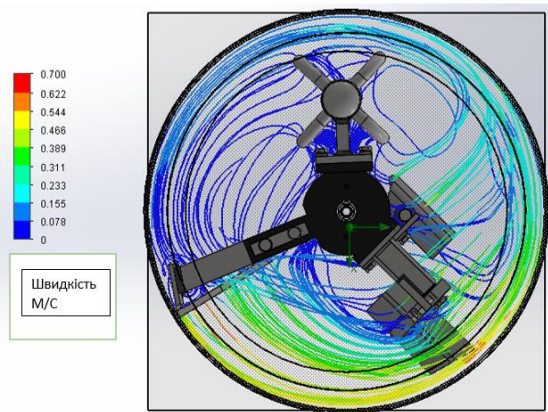


Рисунок 12 – Діаграма розподілу швидкості руху суміші в корпусі змішувача з вдосконаленою вертикальною лопаткою з вирізаним вікном трикутної форми в нижній частині. Кут  $10^\circ$

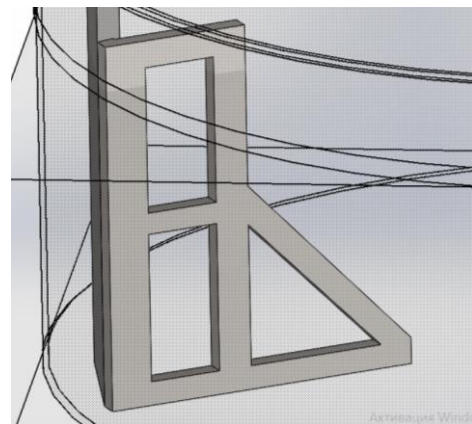


Рисунок 13 – Конструкція моделі змішувача з вдосконаленою вертикальною лопаткою з вирізаними вікнами

Аналіз діаграм швидкостей на рисунках 11 і 12 показав, що максимальні швидкості руху частинок суміші при куті встановлення  $10^\circ$  становлять близько 0,7 м/с. Це свідчить про зменшення максимальної швидкості порівняно з лопаткою у вигляді «сапожка». Однак, як і в попередньому варіанті, спостерігалось зростання швидкості не лише в нижній частині бункера, але й у центральній зоні змішувача. Такий розподіл може забезпечувати активнішу циркуляцію, проте потребує додаткового коригування геометрії лопатки для уникнення надмірного локального перемішування.

Наступним етапом удосконалення конструкції стало влаштування ще одного прямокутного вікна у вертикальній лопатці. Така модифікація була спрямована на перерозподіл потоків суміші через робочий орган, зменшення локального опору та формування більш рівномірної циркуляції в об'ємі змішувача.

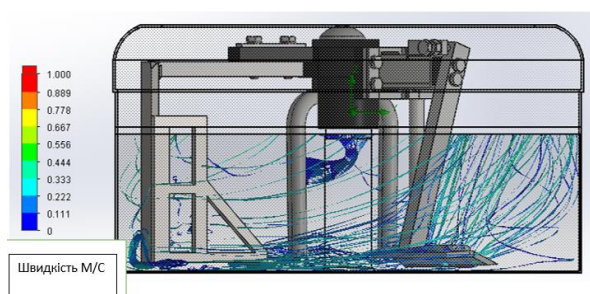


Рисунок 14 – Просторова діаграма розподілу швидкості руху суміші в корпусі змішувача з вдосконаленою вертикальною лопаткою з вирізаними вікнами під кутом  $20^\circ$

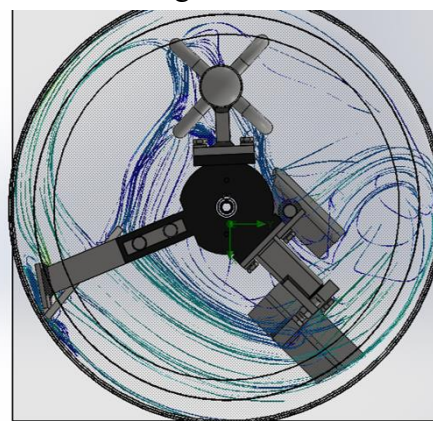


Рисунок 15 – Діаграма розподілу швидкості руху суміші в корпусі змішувача з вдосконаленою вертикальною лопаткою з вирізаними вікнами під кутом  $20^\circ$

Спочатку модернізовану вертикальну лопатку з вирізаними вікнами було досліджено при куті встановлення  $20^\circ$ .

З діаграм швидкостей, наведених на рисунках 14 і 15, видно, що максимальні швидкості руху частинок суміші при куті встановлення  $20^\circ$  зростають до 1,0 м/с. Це менше, ніж у випадку звичайної лопатки під кутом  $20^\circ$ , де максимальна швидкість досягала 1,65 м/с, однак більше, ніж у варіантах із кутом  $10^\circ$ . При цьому траєкторії руху суміші показують більш рівномірну циркуляцію, що свідчить про позитивний вплив вирізаних вікон на перерозподіл потоків у камері.

Останнім етапом моделювання стало дослідження руху суміші при використанні вдосконаленої вертикальної лопатки з вирізаними вікнами, встановленої під кутом  $10^\circ$ .

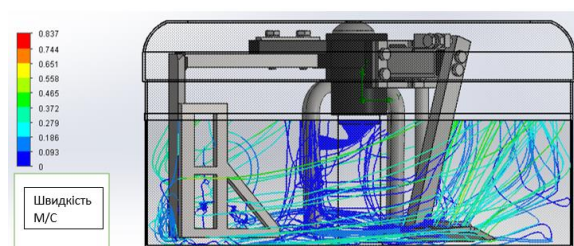


Рисунок 16 – Просторова діаграма розподілу швидкості руху суміші в корпусі змішувача з вдосконаленою вертикальною лопаткою з вирізаними вікнами під кутом  $10^\circ$

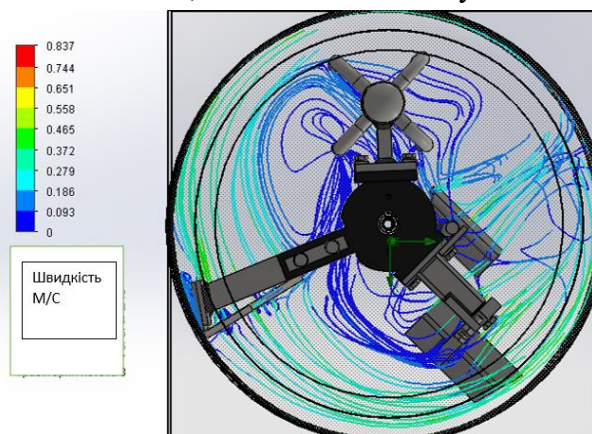


Рисунок 17 – Діаграма розподілу швидкості руху суміші в корпусі змішувача з вдосконаленою вертикальною лопаткою з вирізаними вікнами під кутом  $10^\circ$

За результатами аналізу рисунків 16 і 17 встановлено, що максимальна швидкість руху частинок суміші при куті встановлення  $10^\circ$  зменшується до 0,84 м/с. При цьому, порівняно з варіантом кута  $20^\circ$ , знижується інтенсивність локальних швидкісних піків, а траєкторії руху суміші залишаються достатньо рівномірними. Такий результат свідчить про доцільність використання вдосконаленої лопатки з вирізаними вікнами саме при куті  $10^\circ$ , оскільки цей варіант забезпечує компроміс між інтенсивністю перемішування, рівномірністю циркуляції та зменшенням ризику надмірного навантаження на робочі органи.

Порівняння отриманих результатів показує, що кут встановлення лопаток істотно впливає на швидкість руху суміші та характер її циркуляції в корпусі змішувача. При куті  $20^\circ$  звичайна лопатка створює надмірно високі швидкості до 1,65 м/с, що може призводити до локального інтенсивного перемішування та підвищеного зношування елементів. Зменшення кута до  $10^\circ$  дозволяє знизити максимальну швидкість до 0,7 м/с і покращити рівномірність руху суміші. Модернізація вертикальної лопатки додатково впливає на формування циркуляційних потоків по висоті змішувальної камери.

Найбільш збалансованим варіантом за результатами моделювання можна вважати вдосконалену вертикальну лопатку з вирізаними вікнами при куті встановлення  $10^\circ$ , для якої максимальна швидкість становить близько 0,84 м/с, а траєкторії руху демонструють рівномірну циркуляцію матеріалу. Такий варіант є перспективним для змішувача, що працює разом із бетононасосом, оскільки забезпечує достатню однорідність полістиролбетонної суміші без надмірного підвищення швидкості руху частинок.

**Висновки.** Досліджено вплив кута встановлення лопаток змішувача примусової дії з вертикальним валом на характер руху полістиролбетонної суміші D400 у робочій камері з використанням комп'ютерного моделювання в програмному комплексі SOLIDWORKS. Встановлено, що за кута встановлення звичайної лопатки  $20^\circ$  максимальна швидкість руху частинок суміші досягає 1,65 м/с, що свідчить про надмірну інтенсивність перемішування в окремих зонах, тоді як зменшення кута до  $10^\circ$  забезпечує зниження максимальної швидкості до 0,7 м/с і більш рівномірний розподіл матеріалу в об'ємі змішувача. Показано, що вдосконалення вертикальної лопатки шляхом використання конструкції у вигляді «сапожка» та подальшого введення трикутного і прямокутного вікон дозволяє покращити циркуляцію суміші по висоті камери та зменшити ризик утворення застійних зон. Найбільш раціональним варіантом за результатами моделювання є вдосконалена вертикальна лопатка з вирізаними вікнами, встановлена під кутом  $10^\circ$ , для якої максимальна швидкість руху суміші становить близько 0,84 м/с, а траєкторії переміщення демонструють рівномірну циркуляцію матеріалу. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення конструкції змішувачів примусової дії з вертикальним валом, що працюють у складі технологічної системи «змішувач – бетононасос», з метою підвищення однорідності бетонної суміші, зменшення енерговитрат і забезпечення стабільної подачі матеріалу бетононасосом.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. Jadidi B., Ebrahimi M., Ein-Mozaffari F., Lohi A. Effect of the mixer design parameters on the performance of a twin paddle blender: a DEM study. *Processes*. 2023. Vol. 11, № 3. Article 733. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr11030733>
2. Havlica J., Jirounkova K., Travnickova T., Stanovsky P., Petrus P., Kohout M. Granular dynamics in a vertical bladed mixer: secondary flow patterns. *Powder Technology*. 2019. Vol. 344. P. 79–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.094>
3. Statsenko V., Burmistenkov O., Bila T., Demishonkova S. Determining the loose medium movement parameters in a centrifugal continuous mixer using a discrete element method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3, № 7(111). P. 59–67. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232636>
4. Shirzadi Javid A. A., Ghoddousi P., Aghajani S., Naseri H., Hossein Pour S. Investigating the effects of mixing time and mixing speed on rheological properties, workability, and mechanical properties of self-consolidating concretes. *International Journal of Civil Engineering*. 2021. Vol. 19, № 3. P. 339–355. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00562-z>
5. Hoorijani H., Esgandari B., Zarghami R., Sotudeh-Gharebagh R., Mostoufi N. Predictive modeling of mixing time for super-ellipsoid particles in a four-bladed mixer: a DEM-based approach. *Powder Technology*. 2023. Vol. 430. Article 119009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119009>
6. Nazarenko I., Klymenko M. Application of general energy assessment criteria for preparing building mixtures. *KHNADU Bulletin*. 2020. Vol. 2, № 88. P. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.37>
7. Rudyk R., Salnikov R. Analysis of the mixer geometry and rheology impact on concrete mixture mixing efficiency. *Construction Engineering*. 2024. № 41. P. 77–84. DOI: <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0409>
8. Rudyk R., Virchenko V., Salnikov R., Bidanets S. The effect of the blades on mixing the concrete mixture. *Materials of the 76th Scientific Conference of Professors, Teachers, Researchers, Postgraduate Students and University Students*. Poltava, 2024. P. 270–271.
9. Burlaka S., Kupchuk I., Shapovalyuk S., Chernysh M. Analysis of the influence of the geometry of the blade mixer on the turbulence and intensity of liquid mixing. *Machinery, Energetics, Transport of Agribusiness*. 2023. № 2(121). P. 16–22.

**REFERENCES**

1. Jadidi, B., Ebrahimi, M., Ein-Mozaffari, F., & Lohi, A. (2023). Effect of the mixer design parameters on the performance of a twin paddle blender: A DEM study. *Processes*, 11(3), 733. <https://doi.org/10.3390/pr11030733>
2. Havlica, J., Jirounkova, K., Travnickova, T., Stanovsky, P., Petrus, P., & Kohout, M. (2019). Granular dynamics in a vertical bladed mixer: Secondary flow patterns. *Powder Technology*, 344, 79–88. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.11.094>
3. Statsenko, V., Burmistenkov, O., Bila, T., & Demishonkova, S. (2021). Determining the loose medium movement parameters in a centrifugal continuous mixer using a discrete element method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(7(111)), 59–67.

<https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.232636>

4. Shirzadi Javid, A. A., Ghoddousi, P., Aghajani, S., Naseri, H., & Hossein Pour, S. (2021). Investigating the effects of mixing time and mixing speed on rheological properties, workability, and mechanical properties of self-consolidating concretes. *International Journal of Civil Engineering*, 19(3), 339–355. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00562-z>
5. Hoorijani, H., Esgandari, B., Zarghami, R., Sotudeh-Gharebagh, R., & Mostoufi, N. (2023). Predictive modeling of mixing time for super-ellipsoid particles in a four-bladed mixer: A DEM-based approach. *Powder Technology*, 430, 119009. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2023.119009>
6. Nazarenko, I., & Klymenko, M. (2020). Application of general energy assessment criteria for preparing building mixtures. *KHNADU Bulletin*, 2(88), 37–42. <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2020.88.2.37>
7. Rudyk, R., & Salnikov, R. (2024). Analysis of the mixer geometry and rheology impact on concrete mixture mixing efficiency. *Construction Engineering*, 41, 77–84. <https://doi.org/10.32347/tb.2024-41.0409>
8. Rudyk, R., Virchenko, V., Salnikov, R., & Bidanets, S. (2024). The effect of the blades on mixing the concrete mixture. In *Materials of the 76th Scientific Conference of Professors, Teachers, Researchers, Postgraduate Students and University Students* (pp. 270–271). Poltava.
9. Burlaka, S., Kupchuk, I., Shapovalyuk, S., & Chernysh, M. (2023). Analysis of the influence of the geometry of the blade mixer on the turbulence and intensity of liquid mixing. *Machinery, Energetics, Transport of Agribusiness*, 2(121), 16–22.

Received 24.04.2026.  
Accepted 27.04.2026.  
Published 30.04.2026

***Study of the blade installation angle of a forced-action mixer  
with a vertical shaft in the “mixer — concrete pump” system***

*The article considers the influence of the blade installation angle of a forced-action mixer with a vertical shaft on the process of concrete mixture mixing in the “mixer — concrete pump” technological system. A computer model of the mixer was developed in the SOLIDWORKS software package, which made it possible to study the movement of the mixture in the working chamber, evaluate the distribution of particle velocities, and identify zones of insufficient or excessive mixing. A D400 polystyrene concrete mixture with a compressive strength class of B1.0 was adopted as the studied medium, and the blade movement speed during the simulation was 0.66 m/s. The operation of a conventional 100 mm wide blade at installation angles of 20° and 10° was considered, as well as several variants of a modernized vertical blade, including a “boot-shaped” design, a blade with a triangular cut-out, and a blade with additional openings. It was established that, at a 20° installation angle of the conventional blade, the maximum velocity of mixture particles reaches 1.65 m/s, which may cause excessive mixing intensity in individual zones, whereas reducing the angle to 10° decreases the maximum velocity to 0.7 m/s and provides more uniform material movement. It is shown that the modernized vertical blade with openings at an installation angle of 10° provides a balanced mixing mode with a maximum velocity of about 0.84 m/s and uniform circu-*

*lation of the mixture within the chamber volume. The obtained results can be used to substantiate the rational blade installation angle, improve the design of forced-action mixers with a vertical shaft, increase the homogeneity of the concrete mixture, and ensure its stable supply by a concrete pump.*

*Keywords: forced-action mixer, vertical shaft, blade installation angle, concrete mixture, polystyrene concrete, concrete pump, computer modeling, velocity distribution, mixture homogeneity, blade, mixing.*

**Нестеренко Микола Миколайович** – к.т.н., доцент, доцент кафедри галузевого машинобудування та мехатроніки, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4073-1233>

**Нестеренко Тетяна Миколаївна** – к.т.н., доцент, доцент кафедри нафтогазової інженерії та технологій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2387-8575>

**Аніщенко Анна Ігорівна** – к.т.н., доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3411-0385>

**Пімінов Ігор Георгійович** – к.т.н., доцент кафедри будівельних і дорожніх машин Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6100-3529>

**Mykola Nesterenko** - PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of industrial mechanical engineering and mechatronics National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic».

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4073-1233>

**Tetiana Nesterenko** – PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Oil and Gas Engineering and Technology National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic».

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-2387-8575>

**Anna Anishchenko** – PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation and Computer-Integrated Technologies O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3411-0385>

**Ihor Pimonov** – PhD (Tech), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Construction and Road-building Machinery Kharkiv National Automobile and Highway University.

ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-6100-3529>

## МЕТОД ПРІОРИТЕТНОЇ GOSSIP-СИНХРОНІЗАЦІЇ РОЗПОДІЛЕНИХ ДАНИХ У ГРУПІ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ

*Анотація. Стаття присвячена розробці та дослідженню методу пріоритетної gossip-синхронізації розподілених даних у групі безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Актуальність теми зумовлена стрімким розширенням сфер застосування роїв БПЛА у задачах моніторингу, розвідки, пошуково-рятувальних операцій та логістики, де ефективна синхронізація даних між агентами в режимі реального часу є необхідною умовою успішного виконання місії. Кожен апарат безперервно генерує сенсорні дані: телеметрію, координати, результати спостереження, які необхідно поширювати між агентами для прийняття узгоджених рішень. Існуючі методи синхронізації мають суттєві обмеження: стандартний gossip-протокол не враховує поточний стан вузлів при виборі партнера для обміну, а консенсусний алгоритм Raft вимагає значних витрат на призначення координатора і не забезпечує відмовостійкості при його відключенні. Проблема полягає у необхідності розробки методу синхронізації, який забезпечував би швидку збіжність та мінімальну давність даних у вузлах рою без централізованого координатора. Метою роботи є розробка методу пріоритетної gossip-синхронізації, що базується на функції пріоритету вузла. Кожен агент обирає партнера для обміну з імовірністю, пропорційною значенню його пріоритетної функції, а не рівномірно випадково. Для перевірки запропонованого методу проведено комп'ютерне моделювання для роїв від 50 до 200 БПЛА з усередненням по 30 незалежних запусках. Результати демонструють покращення збіжності на 2.1-5.6% та нижчу середню давність даних порівняно зі стандартним gossip-протоколом. Алгоритм Raft показав найповільнішу збіжність через накладні витрати на призначення координатора. Запропонований метод не потребує централізованого координатора, є відмовостійким при виході окремих агентів з ладу та природно адаптується до змін стану бортових підсистем.*

*Ключові слова: БПЛА, рій, розподілені дані, gossip-протокол, синхронізація даних, пріоритетна функція, мультиагентні системи, Raft, децентралізоване керування, збіжність алгоритму.*

**Постановка проблеми.** Застосування груп БПЛА у задачах розподіленого моніторингу, розвідки та логістики вимагає забезпечення актуальності даних у кожному вузлі рою в режимі реального часу [1]. Кожен апарат безперервно генерує сенсорні дані: телеметрію, координати, результати спостереження, які необхідно поширювати між агентами для прийняття узгоджених рішень. При цьому канали зв'язку між БПЛА є

нестабільними: якість сигналу залежить від відстані між апаратами, рельєфу місцевості та рівня радіозавад.

В умовах таких обмежень централізована синхронізація даних через наземну станцію керування є неприйнятною: вона вимагає стабільного зв'язку з кожним агентом і створює єдину точку відмови [2]. Натомість decentralized gossip-протоколи дозволяють агентам обмінюватись даними безпосередньо між собою без глобального координатора. Проте стандартний gossip-протокол обирає партнера рівномірно випадково, не враховуючи поточний стан вузлів рою, що сповільнює збіжність і збільшує середній час з моменту оновлення у мережі.

Таким чином, існує потреба у методі синхронізації розподілених даних у рої БПЛА, який враховував би динамічний стан вузлів при виборі партнера для обміну, забезпечуючи вищу актуальність даних за умов обмежених ресурсів [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Задача синхронізації даних у розподілених системах є предметом активних досліджень. Gossip-протоколи забезпечують відмовостійке поширення інформації без центрального планувальника [4]. Алгоритм Demers заклав теоретичні основи gossip-поширення, довівши що для рівномірно випадкового вибору сусіда час збіжності є логарифмічним відносно розміру мережі. Проте рівномірний вибір не враховує якість вузлів, що суттєво в умовах гетерогенного рою БПЛА.

Запропоновано механізм вибору сусідів за секторами для покращення збіжності, однак цей підхід не враховує енергетичний стан агентів. Консенсусний алгоритм Raft [5] забезпечує надійну синхронізацію, але вимагає значні накладні витрати на організацію щодо визначення провідного вузла при збільшенні кількості агентів. Модифікації Raft для мультиагентних систем роботів [6] та покращення на основі асинхронної пакетної обробки [7] підвищують його продуктивність, але не вирішують проблему масштабованості для великих роїв. Роботи з розподілу задач у групах БПЛА [8, 9] демонструють важливість врахування стану агентів при прийнятті рішень.

Аналіз існуючих робіт свідчить про відсутність методу gossip-синхронізації, який би враховував комплекс бортових параметрів БПЛА: заряд акумулятора, якість каналу зв'язку та актуальність даних. Це і визначає напрямок даного дослідження.

**Мета дослідження.** Метою дослідження є розробка та перевірки методу пріоритетної gossip-синхронізації розподілених даних у групі БПЛА, що забезпечує вищу актуальність даних у вузлах рою порівняно зі стандартним gossip-протоколом та алгоритмом Raft за рахунок використання пріоритетної функції вибору партнера, яка враховує поточний стан бортових підсистем агента.

**Виклад основного матеріалу.** Запропонований метод базується на модифікації стандартного gossip-протоколу шляхом заміни рівномірно випадкового вибору партнера на зважений вибір за функцією пріоритету. Розглянемо рій з  $N$  агентів, де кожен агент  $i$  у момент часу  $t$  характеризується вектором стану [10]:

$$s_i(t) = \{b_i(t), q_i(t), f_i(t)\} \quad (1)$$

де  $b_i(t)$  є нормованим рівнем заряду акумулятора у діапазоні  $[0, 1]$ ,  $q_i(t)$  є якістю каналу зв'язку у діапазоні  $[0, 1]$ ,  $f_i(t)$  є свіжістю даних вузла у діапазоні  $[0, 1]$ .

Актуальність даних  $f_i(t)$  визначається як функція, що убуває з часом з моменту останнього оновлення:

$$f_i(t) = \max\left(0, 1 - \frac{a_i(t)}{T_{max}}\right) \quad (2)$$

де  $a_i(t)$  є віком даних агента  $i$  у раундах,  $T_{max}$  є максимальним допустимим віком даних. Після кожного успішного обміну рівень актуальності вузла оновлюється до

$$f_j(t + 1) = 1.0 \quad (3)$$

Функція пріоритету агента  $i$  визначається як зважена лінійна комбінація трьох параметрів стану:

$$P(i) = w_1 \cdot b(i) + w_2 \cdot q(i) + w_3 \cdot f(i) \quad (4)$$

де  $w_1 = 0.4$ ,  $w_2 = 0.3$ ,  $w_3 = 0.3$  є ваговими коефіцієнтами, що задовольняють умову  $w_1 + w_2 + w_3 = 1$ . Коефіцієнт  $w_1$  є найбільшим, оскільки агент з низьким зарядом є менш надійним партнером для обміну [13].

На кожному раунді синхронізації агент  $i$  обирає партнера  $j$  із множини доступних сусідів  $C_i$  відповідно до розподілу ймовірностей:

$$P(j|i) = \frac{P(j)}{\sum_{k \in C_i} P(k)}, j \neq i \quad (5)$$

де сума нормує ймовірності по всіх кандидатах у множині  $C_i$ . Неінформовані вузли отримують коефіцієнт 2.0, вузли зі свіжими даними отримують коефіцієнт 0.3 [14].

Для аналізу збіжності розглянемо очікувану кількість раундів  $R$  до поінформованості частки  $p$  вузлів у стандартному gossip-протоколі:

$$E[R_{std}] = \frac{\log N}{\log\left(\frac{N}{N-p \cdot N}\right)} \quad (6)$$

що дає логарифмічну залежність від розміру рою. У пріоритетному gossip-протоколі збіжність прискорюється за рахунок спрямованого вибору неінформованих вузлів [15].

**Порівняльний аналіз методів синхронізації.** Для верифікації запропонованого методу проведено комп'ютерне моделювання з використанням мови Python. Параметри симуляції: розмір рою  $N = \{50, 100, 200\}$  БПЛА, максимальна кількість раундів  $T_{max} = 150$ , кількість незалежних запусків  $RUNS = 30$ . Початкові значення: заряд  $b_i(0) \sim U(0.3, 1.0)$ , якість каналу  $q_i(0) \sim U(0.4, 1.0)$ . Порівнювались три методи: стандартний gossip, запропонований пріоритетний gossip та консенсусний алгоритм Raft [16].

На рис. 1 представлено динаміку збіжності трьох методів для різних розмірів рою. Заштрихована область навколо кривих відповідає стандартному відхиленню по 30 запусках.

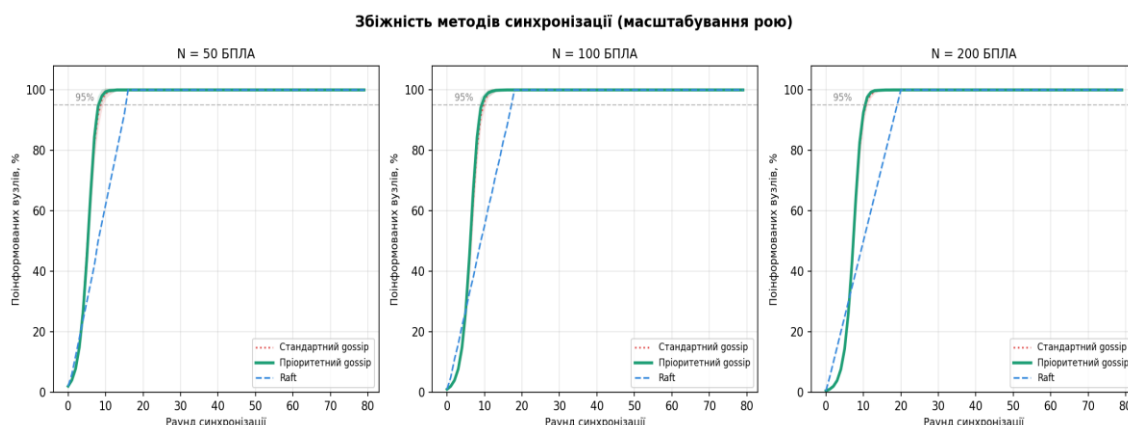


Рисунок 1 - Збіжність методів синхронізації для роїв різного розміру

Аналіз рис. 1 показує, що пріоритетний gossip досягає 95% поінформованості за меншу кількість раундів порівняно зі стандартним gossip при  $N = 100$  та  $N = 200$ . Алгоритм Raft демонструє найповільнішу збіжність через фазу виділення керуючого агента.

На рис. 2 представлено динаміку середнього віку даних у поінформованих вузлах. Цей показник є ключовим для систем реального часу [17].

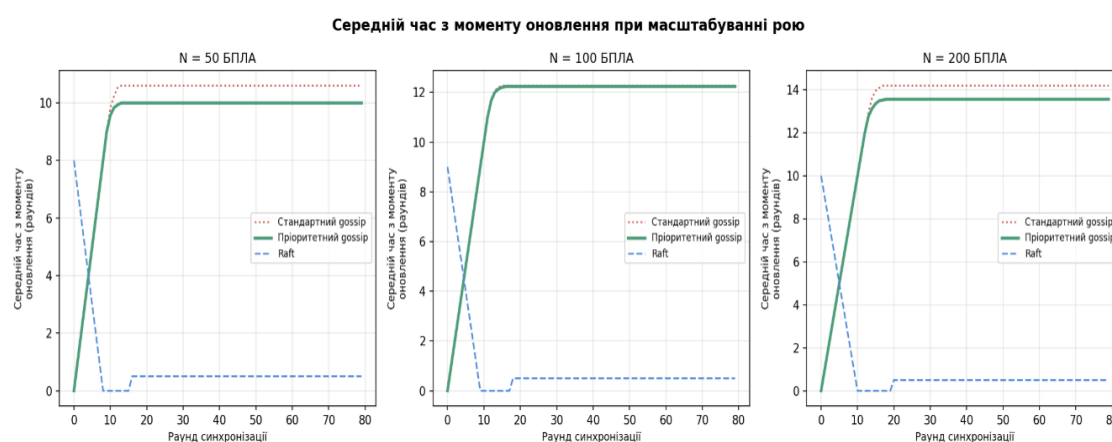


Рисунок 2 - Середній час з моменту оновлення у поінформованих вузлах рою

З рис. 2 видно, що пріоритетний gossip підтримує менший середній термін зберігання даних порівняно зі стандартним gossip впродовж усього процесу синхронізації завдяки пріоритизації вузлів з вищою свіжістю даних  $f(i)$ .

На рис. 3 наведено порівняльну гістограму середньої кількості раундів до досягнення 95% збіжності.

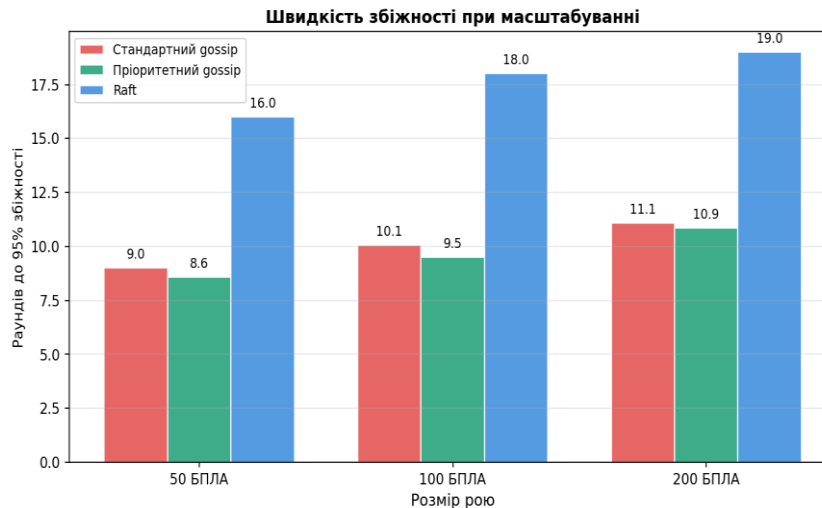


Рисунок 3 - Швидкість збіжності методів при масштабуванні рою

Числові результати симуляції зведено в табл. 1. Покращення пріоритетного gossip відносно стандартного становить від 2.1% до 5.6%.

Таблиця 1

Результати симуляції: середня кількість раундів до 95% збіжності

N (БПЛА)	Стандартний gossip	Пріоритетний gossip	Raft
50	9.0	8.6	16.0
100	10.1	9.5	18.0
200	11.1	10.9	19.0

Отримані результати підтверджують ефективність запропонованого методу пріоритетної gossip-синхронізації, особливо при збільшенні розміру групи до 100 і більше агентів [11, 12].

**Висновки.** У даній роботі розроблено метод пріоритетної gossip-синхронізації розподілених даних у групі БПЛА, що відрізняється від стандартного gossip-протоколу використанням зваженої функції пріоритету вузла

$$P(i) = w_1 \cdot b(i) + w_2 \cdot q(i) + w_3 \cdot f(i) \quad (7)$$

яка враховує рівень заряду акумулятора, якість каналу зв'язку та актуальність даних агента. Вибір партнера для обміну здійснюється пропорційно до значення пріоритетної функції. Проведена комп'ютерна симуляція для роїв розміром 50, 100 та 200 БПЛА з усередненням по 30 незалежних запусках підтвердила ефективність запропонованого підходу. Пріоритетний gossip забезпечує скорочення кількості раундів до досягнення 95% збіжності на 2.1-5.6% порівняно зі стандартним gossip при  $N = 100$  та  $N = 200$ , а також підтримує нижчий середній термін зберігання даних. Алгоритм Raft продемонстрував найповільнішу збіжність через накладні витрати на організацію процедури призначення координатора.

Практична перевага запропонованого методу полягає у тому, що він не потребує централізованого координатора, є відмовостійким при виході окремих агентів з ладу, і адаптується до змін стану бортових підсистем у реальному часі.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптивне налаштування вагових коефіцієнтів  $w_1$ ,  $w_2$ ,  $w_3$  залежно від сценарію застосування рою, а також на дослідження поведінки методу в умовах навмисних перешкод зв'язку та часткової втрати вузлів.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Skaltsis G.M., Shin H.S., Tsourdos A. A Review of Task Allocation Methods for UAVs. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2023. Vol. 109, No. 4. P. 76. <https://doi.org/10.1007/s10846-023-02011-0>
2. Chandran I., Vipin K. Network analysis of decentralized fault-tolerant UAV swarm coordination in critical missions. *Drone Systems and Applications*. 2024. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0101>
3. Проценко М., Маслій Р.,. Аналіз ройових методів керування безпілотними літальними апаратами. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2025. Vol. 359, No. 6(1). P. 357–362. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-49>
4. Zhou Y., Gao W., Rao B., Ding B., Wang W. Neighborhood Selection Synchronization Mechanism-Based Moving Source Localization Using UAV Swarm. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 9. P. 2313. <https://doi.org/10.3390/rs15092313>
5. Ongaro D., Ousterhout J. In Search of an Understandable Consensus Algorithm. *USENIX Annual Technical Conference*. 2014. P. 305-319. <https://www.usenix.org/conference/atc14/technical-sessions/presentation/ongaro>
6. Zhang Y., Cui G., Sui W. A Raft Consensus Algorithm Modification for Adapting Frequent Leader Switch in Multi-agent Swarm Robotics Applications. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2025. Vol. 1338. [https://doi.org/10.1007/978-981-96-2204-7\\_59](https://doi.org/10.1007/978-981-96-2204-7_59)
7. Li H., Liu Z., Li Y. An Improved Raft Consensus Algorithm Based on Asynchronous Batch Processing. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2456-9\\_44](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2456-9_44)
8. Wang G., Lv X., Yan X. A Two-Stage Distributed Task Assignment Algorithm Based on Contract Net Protocol for Multi-UAV Cooperative Reconnaissance. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 18. P. 7980. <https://doi.org/10.3390/s23187980>
9. Li J., Chen R. A Distributed Task Scheduling Method Based on Conflict Prediction for Ad Hoc UAV Swarms. *Drones*. 2022. Vol. 6. P. 356. <https://doi.org/10.3390/drones6110356>
10. Demers A., Greene D., Hauser C. et al. Epidemic Algorithms for Replicated Database Maintenance. *Proceedings of the 6th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*. 1987. P. 1-12. <https://doi.org/10.1145/41840.41841>
11. Zhang H., Cui B., Li Y. et al. An efficient cluster data synchronization scheme based on the Gossip protocol. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 2025. Vol. 51, No. 5. P. 1629-1636. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0750>
12. Tariverdi A., Jha D.K. Rafting Towards Consensus: Formation Control of Distributed Dynamical Systems. *arXiv*. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.10097>

13. Smith R.G. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on Computers*. 1980. Vol. 29, No. 12. P. 1104-1113. <https://doi.org/10.1109/TC.1980.1675516>
14. Poghosyan S., Poghosyan V., Abrahamyan S. et al. Cloud-based mathematical models for self-organizing swarms of UAVs. *Drone Systems and Applications*. 2024. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0039>
15. Zhou Y., Rao B., Wang W. UAV swarm intelligence: recent advances and future trends. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 183856-183878. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028865>
16. Cao Y., Yu W., Ren W., Chen G. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. Vol. 9, No. 1. P. 427-438. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2219061>
17. Wang G., Luo H., Hu X. et al. Fault-tolerant communication topology management for leader-follower UAV formation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2022. <https://doi.org/10.1177/1729881417693965>
18. Xu J., Yao H., Zhang R. et al. Semantic-aware UAV swarm coordination in the metaverse. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2024. Vol. 23, No. 12. P. 13821-13833. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10623271>

#### REFERENCES

1. Skaltsis G.M., Shin H.S., Tsourdos A. A Review of Task Allocation Methods for UAVs. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*. 2023. Vol. 109, No. 4. P. 76. <https://doi.org/10.1007/s10846-023-02011-0>
2. Chandran I., Vipin K. Network analysis of decentralized fault-tolerant UAV swarm coordination in critical missions. *Drone Systems and Applications*. 2024. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0101>
3. Protsenko M., Maslii R. Analysis of swarm control methods for unmanned aerial vehicles. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 2025. Vol. 359, No. 6(1). P. 357–362. URL: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-49>
4. Zhou Y., Gao W., Rao B., Ding B., Wang W. Neighborhood Selection Synchronization Mechanism-Based Moving Source Localization Using UAV Swarm. *Remote Sensing*. 2023. Vol. 15, No. 9. P. 2313. <https://doi.org/10.3390/rs15092313>
5. Ongaro D., Ousterhout J. In Search of an Understandable Consensus Algorithm. *USENIX Annual Technical Conference*. 2014. P. 305-319. <https://www.usenix.org/conference/atc14/technical-sessions/presentation/ongaro>
6. Zhang Y., Cui G., Sui W. A Raft Consensus Algorithm Modification for Adapting Frequent Leader Switch in Multi-agent Swarm Robotics Applications. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2025. Vol. 1338. [https://doi.org/10.1007/978-981-96-2204-7\\_59](https://doi.org/10.1007/978-981-96-2204-7_59)
7. Li H., Liu Z., Li Y. An Improved Raft Consensus Algorithm Based on Asynchronous Batch Processing. *Lecture Notes in Electrical Engineering*. 2022. [https://doi.org/10.1007/978-981-19-2456-9\\_44](https://doi.org/10.1007/978-981-19-2456-9_44)

8. Wang G., Lv X., Yan X. A Two-Stage Distributed Task Assignment Algorithm Based on Contract Net Protocol for Multi-UAV Cooperative Reconnaissance. *Sensors*. 2023. Vol. 23, No. 18. P. 7980. <https://doi.org/10.3390/s23187980>
9. Li J., Chen R. A Distributed Task Scheduling Method Based on Conflict Prediction for Ad Hoc UAV Swarms. *Drones*. 2022. Vol. 6. P. 356. <https://doi.org/10.3390/drones6110356>
10. Demers A., Greene D., Hauser C. et al. Epidemic Algorithms for Replicated Database Maintenance. *Proceedings of the 6th Annual ACM Symposium on Principles of Distributed Computing*. 1987. P. 1-12. <https://doi.org/10.1145/41840.41841>
11. Zhang H., Cui B., Li Y. et al. An efficient cluster data synchronization scheme based on the Gossip protocol. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*. 2025. Vol. 51, No. 5. P. 1629-1636. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0750>
12. Tariverdi A., Jha D.K. Rafting Towards Consensus: Formation Control of Distributed Dynamical Systems. *arXiv*. 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2308.10097>
13. Smith R.G. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on Computers*. 1980. Vol. 29, No. 12. P. 1104-1113. <https://doi.org/10.1109/TC.1980.1675516>
14. Poghosyan S., Poghosyan V., Abrahamyan S. et al. Cloud-based mathematical models for self-organizing swarms of UAVs. *Drone Systems and Applications*. 2024. <https://doi.org/10.1139/dsa-2023-0039>
15. Zhou Y., Rao B., Wang W. UAV swarm intelligence: recent advances and future trends. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 183856-183878. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028865>
16. Cao Y., Yu W., Ren W., Chen G. An overview of recent progress in the study of distributed multi-agent coordination. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2013. Vol. 9, No. 1. P. 427-438. <https://doi.org/10.1109/TII.2012.2219061>
17. Wang G., Luo H., Hu X. et al. Fault-tolerant communication topology management for leader-follower UAV formation. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2022. <https://doi.org/10.1177/1729881417693965>
18. Xu J., Yao H., Zhang R. et al. Semantic-aware UAV swarm coordination in the metaverse. *IEEE Transactions on Mobile Computing*. 2024. Vol. 23, No. 12. P. 13821-13833. <https://ieeexplore.ieee.org/document/10623271>

Received 23.04.2026.

Accepted 27.04.2026.

Published 30.04.2026

***Priority gossip-based synchronization method for distributed data  
in a group of unmanned aerial vehicles***

*This paper presents the development and investigation of a priority gossip synchronization method for distributed data in a group of unmanned aerial vehicles (UAVs). The relevance of the topic is driven by the rapid expansion of UAV swarm applications in monitoring, reconnaissance, search and rescue, and logistics tasks, where effective real-time data synchronization between agents is a necessary condition for successful mission execution. Each UAV continuously generates sensor data including telemetry, coordinates, and observation results that must be distributed across the swarm for coordinated decision-making. Existing*

*synchronization methods have significant limitations: the standard gossip protocol does not account for the current state of nodes when selecting an exchange partner, while the Raft consensus algorithm incurs substantial overhead for coordinator assignment and does not ensure fault tolerance upon coordinator failure. The problem lies in the need to develop a synchronization method that ensures fast convergence and minimal data staleness in swarm nodes without a centralized coordinator. The aim of the study is to develop a priority gossip synchronization method based on a node priority function. Each agent selects an exchange partner with probability proportional to its priority value rather than uniformly at random. For verification, computer simulation was conducted for swarms ranging from 50 to 200 UAVs, averaged over 30 independent runs. The results demonstrate a convergence improvement of 2.1–5.6% and lower average data staleness compared to the standard gossip protocol. The Raft algorithm showed the slowest convergence due to coordinator assignment overhead. The proposed method requires no centralized coordinator, is fault-tolerant upon individual agent failure, and adapts naturally to changes in onboard subsystem states.*

*Keywords: UAV, swarm, distributed data, gossip protocol, data synchronization, priority function, multi-agent systems, Raft, decentralized control, algorithm convergence.*

**Проценко Михайло Ігорович** - аспірант кафедри АІТ, факультет інтелектуальних інформаційних технологій та автоматизації, Вінницький національний технічний університет, Україна, Вінниця.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7359-4874>

**Маслій Роман Васильович** - доцент кафедри АІТ, Вінницький національний технічний університет, Україна, Вінниця.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3021-4328>

**Protsenko Mykhailo** - Department of Intelligent Information Technologies and Automation, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, Vinnytsia.

ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-7359-4874>

**Maslii Roman** - associate professor at the Department of AIIT, Vinnytsia National Technical University, Ukraine, Vinnytsia.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3021-4328>

**ЗМІСТ**

**CONTENTS**

<b>Кісельов Б.Г., Сенько А.О., Купін А.І., Балик Д.К.</b> Емпіричне визначення мінімально достатнього обсягу навчальної вибірки для моделей машинного навчання за заданого рівня похибки	3	<b>Kiselov B.H., Senko A.O., Kupin A.I., Balyk D.K.</b> Empirical determination of the minimum sufficient training sample size for machine learning models at a given error level	3
<b>Сметана М.О., Шкурат О.С.</b> Метод та програмне забезпечення для підвищення якості зображень	16	<b>Smetana M., Shkurat O.</b> Method and software for image quality enhancement	16
<b>Гусєв А.Ю., Клим В.Ю.</b> Проблеми підвищення ефективності вбудованих систем керування з модулем комп'ютерного зору	25	<b>Husiev A., Klym V.</b> Issues of improving the efficiency of embedded control systems with a computer vision module	25
<b>Димо В.В., Гожий О.П.</b> Сегментація зображень з урахуван- ням невизначеності за допомогою архітектури U-Net і Monte Carlo Dropout	35	<b>Dymo V.V., Gozhy O.P.</b> Uncertainty-based image segmentation using U-Net architecture and Monte Carlo Dropout	35
<b>Гриценко А.М., Азарян А.А., Рубан С.А.</b> Проектування безпечної архітектури розподіленої системи збору та накопичення промислових даних на платформі Java	47	<b>Hrytsenko A.M., Azaryan A.A., Ruban S.A.</b> Design of a secure architecture for a distributed industrial data collection and storage system on the Java platform	47
<b>Кавац О.О.</b> Методологічні підходи та інформа- ційні технології супутникового моніторингу екологічних ризиків у гірничодобувній промисловості	56	<b>Kavats O.O.</b> Methodological approaches and infor- mation technologies for satellite monitoring of environmental risks in the mining industry	56
<b>Лучик С.Д., Мудрицький І. В., Мойко О.О., Стецик Р.М.</b> Кібергігієна молоді у соціальних платформах: від аналізу AiTM-атак до моделей безпечної поведінки	64	<b>Luchyk S.D., Mudrytskyi I. V., Moiko O.O., Stetsyk R. M.</b> Youth cyberhygiene on social plat- forms: from analysis of AiTM attacks to models of safe behavior	64

<b>Зимогляд А.Ю.,</b> <b>Гуда А.І., Редчиць Д.О.</b> Принципи та рішення створення обладнання живлення та вимірювання для дослідження плазмових актуаторів	79	<b>Zimoglyad A.Yu.,</b> <b>Guda A.I., Redchyts D.O.</b> Principles and solutions for creating power and measurement equipment for plasma actuator research	79
<b>Дукач А.Ю.,</b> <b>Рудакова Г.В., Поліщук В.М.</b> Аналіз методів керування процесів термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах	89	<b>Dukach A.Yu.,</b> <b>Rudakova H.V., Polishchuk V.M.</b> Analysis of control methods for thermal processing of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves	89
<b>Сподинець О., Божуха Л.М.</b> Дослідження технологій та розроблення системи керування пристроєм на базі штучного інтелекту	99	<b>Spodynets O., Bozhukha L.</b> Research into technologies and development of artificial intelligence-based device control system	99
<b>Поливода О.В., Назмеєв І.О.</b> Метод інтелектуальної ідентифікації рухомих об'єктів на основі кластеризації ознак у мел-кепстральному просторі	108	<b>Polyvoda O. V., Nazmieiev I. O.</b> Intelligent method for moving object identification based on feature clustering in the mel-frequency cepstral domain	108
<b>Аджамський С.В., Кононенко Г.А.,</b> <b>Подольський Р.В., Бадюк С.І.,</b> <b>Подольська О.А.</b> Вплив об'ємної щільності енергії (VED) на пористість та механічні властивості сплаву Inconel 718, виготовленого методом лазерного плавлення в порошковому шарі	120	<b>Adzhamsky S.V., Kononenko G.A.,</b> <b>Podolskyi R.V., Badyuk S.I.,</b> <b>Podolska O.A.</b> Effect of volume energy density (VED) on the porosity and mechanical properties of Inconel 718 alloy manufactured by laser melting in a powder layer	120
<b>Гончаров О.Г., Удовик І.М.,</b> <b>Гнатушенко Вік.В.</b> Конструювання запитів для класифікації земного покриття без навчальних прикладів за допомогою мультимодальних мовних моделей на знімках Sentinel-2	130	<b>Honcharov O., Udovyk I.,</b> <b>Hnatushenko Vik.</b> Prompt engineering for zero-shot land cover classification using multimodal language models on Sentinel-2 imagery	130

<p><b>Скоромний А.Л.</b> Закономірності формування сумарних енергетичних витрат рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією на стадіях виготовлення та експлуатації</p>	<p>148</p>	<p><b>Skoromnyi A.L.</b> Regularities of formation of total energy expenditures of pulse-jet bag filters at the stages of manufacturing and operation</p>	<p>148</p>
<p><b>Прокоф'єва К.А., Решетілова О.М., Савченко С.В.</b> Сучасні інформаційні технології опрацювання та пошуку оцифрованих документів у навчанні студентів спеціальності В 13 «Бібліотечна, інформаційна та архівна справа»</p>	<p>161</p>	<p><b>Prokofieva K., Reshetilova O., Savchenko S.</b> Modern information technologies for processing and searching digitized documents in the education of students of the specialty B 13 "Library, information and archival affairs"</p>	<p>161</p>
<p><b>Гавріков В.В., Бугрова Т.М.</b> Локальна подача модифікуючих компонентів у зону вібраційного ущільнення бетонної суміші</p>	<p>175</p>	<p><b>Havrikov V., Buhrova T.</b> Local supply of modifying components to the vibration compaction zone of a concrete mixture</p>	<p>175</p>
<p><b>Москаленко М.Л.</b> Текстовий стандарт опису API як інструмент підвищення якості тестування програмного забезпечення</p>	<p>184</p>	<p><b>Moskalenko M.L.</b> Textual API description standard as a tool for improving software testing quality</p>	<p>184</p>
<p><b>Котов І.А., Швець Д.В., Карабут Н.О.</b> Програмна реалізація математичних моделей продукційних форм баз знань диспетчеризації режимів енергосистем</p>	<p>201</p>	<p><b>Kotov I.A., Shvets D.V., Karabut N.O.</b> Software implementation of mathematical models for production-rule knowledge bases in power system dispatch control</p>	<p>201</p>
<p><b>Нестеренко М.М., Нестеренко Т.М., Пімінов І.Г., Аніщенко А.І.</b> Дослідження кута встановлення лопаток змішувача примусової дії з вертикальним валом у системі «змішувач — бетононасос»</p>	<p>213</p>	<p><b>Nesterenko M., Nesterenko T., Pimonov I., Anishchenko A.</b> Study of the blade installation angle of a forced-action mixer with a vertical shaft in the "mixer — concrete pump" system</p>	<p>213</p>

**Проценко М.І., Маслій Р.В.**

Метод пріоритетної Gossip-  
синхронізації розподілених даних у  
групі безпілотних літальних апаратів

225

**Protsenko M.I., Maslii R.V.**

Priority Gossip synchronization  
method for distributed data in a group  
of unmanned aerial vehicles

225

РЕФЕРАТИ

УДК 004.8:622.7

Кісельов Б.Г., Сенько А.О., Купін А.І., Балик Д.К. **Емпіричне визначення мінімально достатнього обсягу навчальної вибірки для моделей машинного навчання за заданого рівня похибки** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.3 – 15.

Розглядається задача визначення мінімально достатнього обсягу навчальної вибірки у системах сенсорного сортування руд. Запропоновано методика на основі ієрархії підходів: крива навчання – параметрична степенева екстраполяція – GP-based learning-type curve. Проведено експеримент на реальних сенсорних даних (699 спостережень). Модель HistGradientBoostingRegressor досягла  $R^2 = 0,93$ . Мінімально достатній обсяг вибірки для  $RMSE \leq 12$  оцінено в діапазоні 559–810 залежно від методу та рівня надійності.

Бібл. 12, іл. 5, табл. 3.

УДК 004.42:004.932

Сметана М.О., Шкурят О.С. **Метод та програмне забезпечення для підвищення якості зображень** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.16 – 24.

Розглянуто задачу покращення якості цифрових зображень в умовах неоднорідності сцен і спотворень. Запропоновано адаптивний метод, що визначає тип вхідного зображення та застосовує GFPGAN для портретів, Real-ESRGAN для розмитих або низькодеталізованих зображень і AIEA для інших сцен. Розроблено програмне забезпечення для автоматичного вибору маршруту оброблення. Порівняння за метриками PSNR та SSIM підтвердило доцільність адаптивної маршрутизації та спеціалізованого покращення якості зображень.

Бібл. 11, рис. 2, табл. 1.

УДК 681.51:004.93:004.384

Гусев А.Ю., Клим В.Ю. **Проблеми підвищення ефективності вбудованих систем керування з модулем комп'ютерного зору** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.25 – 34.

У статті досліджується проблема підвищення ефективності вбудованих систем автоматичного керування, де алгоритми комп'ютерного зору діють як віртуальні датчики. Проаналізовано підходи Edge AI та TinyML до компресії нейромереж. Припущено, що оптимізація моделей без урахування динаміки об'єкта керування знижує запаси стійкості через появу стохастичного шуму. Запропоновано новий підхід до дослідження (що поєднує цифрові двійники, емуляцію та Hardware-in-the-loop) для пошуку оптимального компромісу між затримкою інференсу та точністю розпізнавання задля підвищення надійності автономних кіберфізичних систем.

Бібл. 10, іл. 1.

УДК 004.08

Димо В.В., Гожий О.П. **Сегментація зображень з урахуванням невизначеності за допомогою архітектури U-Net і Monte Carlo Dropout** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.35 – 46.

Розглядається сегментаційна модель модифікованої архітектури U-Net з використанням модуля ASPP замість bottleneck, а також врахування невизначеності за допомогою Monte Carlo Dropout, яка розраховується шляхом множинного запуску моделі з різними масками відсіювання. Шляхом експерименту підтверджено позитивний вплив модифікованої архітектури, а також комбінованої функції витрат на точність сегментації, для подальшого покращення запропоновано використовувати комбінований підхід з урахуванням двох порогових значень: невизначеності прогнозу й впевненості моделі в сегментації зображення, що застосовується попіксельно. В свою чергу існує необхідність подальшого дослідження в цьому напрямі для застосування зазначених методів та підходів на практиці.

Бібл. 11, іл. 5, табл. 1.

УДК: 004.75:004.056:004.415

Гриценко А.М., Азарян А.А., Рубан С.А. **Проектування безпечної архітектури розподіленої системи збору та накопичення промислових даних на платформі Java** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.47 – 55.

У статті розглянуто проблему забезпечення цілісності та безпеки технологічних даних у гірничо-видобувній галузі. Метою є проектування захищеної розподіленої Java-архітектури для збору, збереження та обробки даних. Використано методи системного аналізу, моделювання загроз і архітектурного проектування. Запропоновано мікросервісну архітектуру з принципами Security-by-Design, mTLS, RBAC та подієвою взаємодією. Результати демонструють підвищення відмовостійкості завдяки гібридному зберіганню з реплікацією та синхронізацією даних, що забезпечує усунення єдиних точок відмови та інтеграцію в сучасну ІТ-інфраструктуру.

Бібл. 16, іл. 5.

УДК 004.9:528.8:504.05

Кавац О.О. **Методологічні підходи та інформаційні технології супутникового моніторингу екологічних ризиків у гірничодобувній промисловості** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.56 – 63.

У статті досліджено сучасні інформаційні технології ДЗЗ та їх роль у забезпеченні екологічної безпеки гірничодобувних регіонів України. Гірничодобувна галузь розглянута як стратегічний сектор, що водночас створює високе техногенне навантаження на довкілля через накопичення відходів у хвостосховищах. Проблеми моніторингу цих об'єктів значно загострилися внаслідок воєнних дій та обмеження доступу до підприємств, що унеможлиблює проведення традиційних наземних обстежень. Викори-

стання супутникових платформ є ключовим інструментом для отримання об'єктивної інформації про стан довкілля у важкодоступних зонах.

Бібл.11, Рис. 2.

УДК 004.056.5:316.472.4-053.6

Лучик С.Д., Мудрицький І. В., Мойко О.О., Стецик Р.М. **Кібергігієна молоді у соціальних платформах: від аналізу АіТМ-атак до моделей безпечної поведінки** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.64 – 78.

Проведено комплексне дослідження ризиків, з якими стикається молодіжна аудиторія у сучасних соціальних медіапросторах. Представлено класифікацію соціальних мереж за віковими групами користувачів, що дозволило ідентифікувати пріоритетні вектори атак для кожної платформи. На основі емпіричного опитування виявлено критичні прогалини в цифровій обізнаності молоді. Розроблено триярусна модель захисту, що включає загальносистемні, платформно-орієнтовані (Telegram, Instagram, TikTok) та мережеві (Wi-Fi безпека) рекомендації. Запропонований освітньо-поведінковий підхід зміщує акцент із суто технічних засобів захисту на формування активної цифрової стійкості користувача.

Бібл. 9, табл. 2.

УДК 533.9

Зимогляд А.Ю., Гуда А.І., Редчиць Д.О. **Принципи та рішення створення обладнання живлення та вимірювання для дослідження плазмових актуаторів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.79 – 88.

В статті описано конструкцію регульованого джерела високої змінної напруги, з регулюванням частоти та можливістю вимірювати вихідний струм та напругу. Приведено схеми і їх опис, особливості конструкції.

Проведено серію дослідів на працездатність всіх її елементів та модулів. Конструкція показала свою працездатність і може бути використана в серії лабораторних досліджень з керування плазменних актуаторів.

Бібл. 6, іл. 8.

УДК 681.5:637.133.7.03

Дукач А.Ю., Рудакова Г.В., Поліщук В.М. **Аналіз методів керування процесів термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.89 – 98.

У роботі проведено аналіз існуючих методів керування процесами термічної обробки плодоовочевих консервів у вертикальних автоклавах. Розглянуто проблеми використання традиційних пропорційно-інтегрально-диференціальних (ПІД) регуляторів, зумовлені значною тепловою інерційністю об'єкта та складністю налаштування під різні типи і маси завантаження. Проаналізовано перспективні підходи до автоматизації, зокрема прогнозує керування на основі моделей (МРС), яке дозволяє оптимізувати

процес безпосередньо за цільовим показником накопиченої мікробіологічної летальності (F0) з урахуванням технологічних обмежень. Окрему увагу приділено можливостям застосування інтелектуальних методів, таких як адаптивні нечіткі регулятори (Fuzzy-PID) та штучні нейронні мережі (ANN), що виконують функцію віртуальних "м'яких сенсорів" для прогнозування температури всередині тари. За результатами аналізу обґрунтовано необхідність переходу до гібридних інтелектуальних систем керування для забезпечення енергоефективності, компенсації нелінійності процесів теплообміну та збереження харчової цінності складноструктурної гетерогенної продукції.

Бібл. 7, іл. 2.

УДК 004.021, 004.042, 004.048, 004.3, 004.9

Сподинець О., Божуха Л.М. **Дослідження технологій та розроблення системи керування пристроєм на базі штучного інтелекту** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.99 – 107.

Стаття присвячена розробці та реалізації інтелектуальної системи керування FPV-пристроєм, яка здатна виконувати автономне донаведення на ціль при втраті зв'язку з оператором. Актуальність дослідження обумовлена широким застосуванням FPV-пристроїв та необхідністю подолання їх ключового недоліку - залежності від стабільного радіозв'язку.

Бібл. 9, іл. 4, табл. 1.

УДК 004.93:681.5.015

Поливода О.В., Назмєєв І.О. **Метод інтелектуальної ідентифікації рухомих об'єктів на основі кластеризації ознак у мел-кепстральному просторі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.108 – 119.

Розроблено метод інтелектуальної ідентифікації рухомих об'єктів на основі мел-кепстрального аналізу та кластеризації K-means. Авторами запропоновано перехід від вразливих амплітудних методів до аналізу ознак у кепстральному просторі. Методика включає віконне перетворення Фур'є, психоакустичну фільтрацію та декореляцію ознак для формування унікального цифрового відбитка. Експериментально підтверджено ефективну сегментацію фаз наближення, проїзду та віддалення об'єкта. Метод відзначається інваріантністю до коливань гучності та високою швидкістю обчислень, що дозволяє його інтегрувати в реальні системи промислової автоматизації та інтелектуальні транспортні системи моніторингу в режимі реального часу.

Бібл. 6, іл. 4.

УДК 621.74:621.9.048.4:669.295

Аджамський С.В., Кононенко Г.А., Подольський Р.В., Бадюк С.І., Подольська О.А. **Вплив об'ємної щільності енергії (VED) на пористість та механічні властивості сплаву Inconel 718, виготовленого методом лазерного плавлення в порошковому шарі** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.120 – 129.

У роботі досліджено вплив об'ємної щільності енергії (VED) на пористість та механічні властивості сплаву Inconel 718, виготовленого методом лазерного плавлення в

порошковому шарі (LPBF). Зразки отримано при двох значеннях VED 48,7 та 57,6 Дж/мм<sup>3</sup> за умови забезпечення сталої високої відносної щільності 99,8 %. Встановлено, що за однакової щільності характер пористості відрізняється залежно від VED: при більш високому VED спостерігається більша кількість дрібних пор, тоді як при нижчому – поодинокі дефекти більшого розміру. Показано, що зміна VED практично не впливає на міцність, проте суттєво впливає на пластичні характеристики. Отримані результати підтверджують необхідність комплексної оптимізації режимів LPBF із урахуванням морфології дефектів та механічних властивостей, а не лише показника відносної щільності матеріалу.

Бібл. 13, іл. 3, табл. 2.

УДК 528.8:004.8

Гончаров О.Г., Удовик І.М., Гнатушенко Вік.В. **Конструювання запитів для класифікації земного покриття без навчальних прикладів за допомогою мультимодальних мовних моделей на знімках Sentinel-2** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.130 – 147.

Розроблено підхід до конструювання запитів до мультимодальних мовних моделей (VLM) для підвищення точності класифікації земного покриття без навчальних прикладів на знімках Sentinel-2. Виявлено та описано явище хибної класифікації за кольором сегментаційної маски (color leakage). Запропоновано протокол із чотирьох обов'язкових правил, що усуває це явище та забезпечує підвищення коректності структурованого виводу (FCR) з  $\approx 60\%$  до  $97\%$ .

Бібл. 21, іл. 2, табл. 7.

УДК 628.511:620.9

Скоромний А.Л. **Закономірності формування сумарних енергетичних витрат рукавних фільтрів з імпульсною регенерацією на стадіях виготовлення та експлуатації** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.148– 160.

В роботі проаналізовано енергоспоживання протягом життєвого циклу фільтрів рукавних з імпульсною регенерацією (ФРІР) для очищення димових газів на гірничо-металургійних підприємствах України за 30 років. На основі даних ДП «УкрНТЦ «Енергосталь» отримані залежності площі фільтрації, маси та витрат стисненого повітря від продуктивності, від яких залежать енерговитрати на виробництво металу, будівництво корпусів та механічного обладнання, створення фільтрувальних рукавів, роботу вентилятора та компресора. Встановлено, що річні експлуатаційні витрати дорівнюють витратам на виробництво, розкриваючи ключові фактори сумарної енергоємності та нові підходи до оптимізації сумарних енерговитрат.

Бібл. 16, іл. 5.

УДК 004.738.5+025.4.036:378

Прокоф'єва К.А., Решетілова О.М., Савченко С.В. **Сучасні інформаційні технології опрацювання та пошуку оцифрованих документів у навчанні студентів спеціальності В 13 «Бібліотечна, інформаційна та архівна справа»** // Системні техноло-

гії. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.161– 174.

Розглядаються процеси оцифрування документної спадщини та створення електронних колекцій у бібліотечних і архівних установах. Особливу увагу приділено класифікації документів, що підлягають оцифруванню, зокрема унікальним матеріалам, архівним і бібліотечним фондам, рукописам, документам підвищеного попиту та матеріалам, представленим в обмеженій кількості. Оцифрування таких документів вважається ефективним підходом до збереження оригіналів із одночасним забезпеченням ширшого доступу до інформаційних ресурсів. Описано технологічні етапи створення цифрових копій, зокрема сканування, технічне опрацювання зображень, контроль якості та зберігання цифрових файлів. Окремий акцент зроблено на створенні страхових копій, призначених для довготривалого зберігання, а також користувацьких електронних версій, орієнтованих на публічний доступ.

Бібл. 6, іл. 4.

УДК 621.928.23

Гавріков В.В., Бугрова Т.М. **Локальна подача модифікуючих компонентів у зону вібраційного ущільнення бетонної суміші** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.175– 183.

У статті розглянуто конструктивно-технологічне рішення системи локальної подачі цементного молочка або модифікуючих компонентів у зону вібраційного ущільнення бетонної суміші, що забезпечує поєднання механічної дії глибинного вібратора з цільовим введенням активної рідкої фази. Обґрунтовано склад і принцип роботи системи, яка передбачає приготування однорідної рідкої композиції, її подачу насосом через напірну магістраль та введення через жиклери насадки безпосередньо в зону інтенсивного ущільнення бетонної суміші. Показано, що таке рішення дозволяє підвищити рівномірність розподілу в'язучого або добавок у локальному об'ємі суміші, покращити змочування заповнювача, зменшити пористість і запобігти утворенню сухих або недостатньо ущільнених ділянок.

Бібл. 9, рис. 1.

УДК 004.415.5:006.3

Москаленко М.Л. **Текстовий стандарт опису API як інструмент підвищення якості тестування програмного забезпечення** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.184– 200.

У статті досліджено проблему відсутності єдиного стандарту для текстового опису API-ендпоінтів у корпоративній документації. Проведено аналіз чотирьох актуальних syllabuses ISTQB та встановлено нормативну прогалину. Запропоновано стандарт MADS - шаблон з десяти полів, згрупованих у блоки ідентифікації, вхідних даних, вихідних даних і безпеки. Апробація на трьох REST-ендпоінтах за п'ятьма метриками покриття показала зростання середнього покриття з 23% до 100%. Обґрунтовано роль MADS у RAG-пайплайнах і MCP-архітектурах генерації тест-кейсів на базі LLM.

Бібл. 30, рис. 2, табл. 7.

УДК 004.415:004.82:681.51:621.31

Котов І.А., Швець Д.В., Карабут Н.О. **Програмна реалізація математичних моделей продукційних форм баз знань диспетчеризації режимів енергосистем** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.201– 212.

У статті досліджуються інтелектуальні системи на основі баз знань для підтримки диспетчерського керування електроенергетичними системами в умовах жорсткого дефіциту часу. Ефективність управління забезпечується попередньою обробкою схемно-режимної інформації та застосуванням методів ситуаційного моделювання. Для розпізнавання і класифікації аварійних ситуацій пропонується використання продукційної форми подання знань, побудованої на теоретичному апараті мереж Петрі. Це дозволяє генерувати несуперечливі логічні моделі прийняття рішень з урахуванням паралелізму. Побудова бази знань здійснюється за допомогою навчальних вибірок на основі матриць планування факторних експериментів. Розроблена інтегральна модель на базі семантичних і продукційних мереж призначена для планування протиаварійних заходів у районних електричних мережах.

Бібл. 11, іл. 3.

УДК 621.929.7:666.97.031

Нестеренко М.М., Нестеренко Т.М., Пімінов І.Г., Аніщенко А.І. **Дослідження кута встановлення лопаток змішувача примусової дії з вертикальним валом у системі «змішувач — бетононасос»** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.213– 224.

У статті розглянуто вплив кута встановлення лопаток змішувача примусової дії з вертикальним валом на процес перемішування бетонної суміші в технологічній системі «змішувач — бетононасос». Основну увагу приділено забезпеченню однорідності суміші, рівномірному розподілу компонентів у робочій камері та формуванню стабільних реологічних властивостей, необхідних для подальшої подачі матеріалу бетононасосом.

Бібл. 9, рис. 17.

УДК 004.896

Проценко М.І., Маслій Р.В. **Метод пріоритетної Gossip-синхронізації розподілених даних у групі безпілотних літальних апаратів** // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. - Випуск 4(165). – Дніпро, 2026. – С.225– 233.

Розглядається метод пріоритетної gossip-синхронізації розподілених даних у рої БПЛА. Запропоновано функцію пріоритету вузла, що враховує рівень заряду акумулятора, якість каналу зв'язку та актуальність даних агента. На відміну від стандартного gossip-протоколу, вибір партнера для обміну здійснюється пропорційно до значення пріоритетної функції. Проведено комп'ютерне моделювання для роїв від 50 до 200 БПЛА. Показано покращення збіжності на 2.1–5.6% порівняно зі стандартним gossip-протоколом.

Бібл. 17, іл. 3, табл. 1.

UDC 004.8:622.7

Kiselov B.H., Senko A.O., Kupin A.I., Balyk D.K. **Empirical determination of the minimum sufficient training sample size for machine learning models at a given error level** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.3 – 15.

The paper addresses the problem of determining the minimum sufficient training sample size for regression models in sensor-based ore sorting systems. A methodology based on a hierarchy of approaches is proposed: learning curve – parametric power-law extrapolation – GP-based learning-type curve. Experiments on real sensor data (699 observations) show that HistGradientBoostingRegressor achieves  $R^2 = 0.93$ . The minimum sufficient sample size for  $RMSE \leq 12$  is estimated in the range 559–810 depending on the method and confidence level.

Ref. 12, fig. 5, tab. 3.

UDC 004.42:004.932

Smetana M., Shkurat O. **Method and software for image quality enhancement** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.16 – 24.

The paper addresses image quality enhancement for heterogeneous scenes and distortions. An adaptive method is proposed that identifies the input image type and applies GFPGAN to portrait images, Real-ESRGAN to blurred or low-detail images, and AIEA to other scenes. Desktop software implementing automatic routing and enhancement was developed. The PSNR and SSIM comparison confirms the effectiveness of content-aware routing and specialized image enhancement.

Ref. 11, fig. 2, tabl. 1.

UDC 681.51:004.93:004.384

Husiev A., Klym V. **Issues of improving the efficiency of embedded control systems with a computer vision module** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.25 – 34.

The article investigates the problem of improving the efficiency of embedded automatic control systems in which computer vision algorithms serve as virtual sensors. Edge AI and TinyML approaches to neural network compression are analyzed. It is hypothesized that optimizing models without considering the control object's dynamics reduces stability margins due to the emergence of stochastic noise. A new research approach (combining digital twins, emulation, and Hardware-in-the-loop) is proposed to determine the optimal trade-off between inference latency and recognition accuracy, thereby enhancing the reliability of autonomous cyber-physical systems.

Ref. 10, fig. 1.

UDC 004.08

Dymo V.V., Gozhy O.P. **Uncertainty-based image segmentation using U-Net architecture and Monte Carlo Dropout** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.35 – 46.

The segmentation model of the modified U-Net architecture using the ASPP module instead of the bottleneck is considered, as well as taking into account uncertainty using Monte Carlo Dropout, which is calculated by multiple runs of the model with different dropout

masks. The experiment confirmed the positive impact of the modified architecture, as well as the combined cost function on the segmentation accuracy, for further improvement it was proposed to use a combined approach taking into account two threshold values: prediction uncertainty and model confidence in image segmentation, which is applied pixel wise. In turn, there is a need for further research in this direction for the application of these methods and approaches in practice.

Bibl. 11, fig. 5, tabl. 1.

UDC 004.75:004.056:004.415

Hrytsenko A.M., Azaryan A.A., Ruban S.A. **Design of a secure architecture for a distributed industrial data collection and storage system on the Java platform** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.47 – 55.

Abstract. The article addresses the challenges of ensuring the integrity and security of technological data within the mining industry. The objective is to design a secure, distributed Java-based architecture for data acquisition, storage, and processing. The research employs methods of systems analysis, threat modeling, and architectural design. A microservices architecture incorporating Security-by-Design principles, mTLS, RBAC, and event-driven interaction is proposed. The results demonstrate enhanced fault tolerance through hybrid storage with data replication and synchronization, ensuring the elimination of single points of failure and seamless integration into modern IT infrastructure.

Refs. 16, figs. 5.

UDK 004.9:528.8:504.05

Kavats O.O. **Methodological approaches and information technologies for satellite monitoring of environmental risks in the mining industry** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.56 – 63.

This article examines modern remote sensing technologies and their role in ensuring the environmental safety of mining regions in Ukraine. The mining industry is regarded as a strategic sector which, at the same time, places a significant anthropogenic burden on the environment due to the accumulation of waste in tailings ponds. The challenges of monitoring these sites have become significantly more acute as a result of military operations and restricted access to industrial sites, which makes traditional ground-based surveys impossible. The use of satellite platforms is a key tool for obtaining objective information on the state of the environment in hard-to-reach areas.

Bib. 11, Fig. 2.

UDC 004.056.5:316.472.4-053.6

Luchyk S.D., Mudrytskyi I. V., Moiko O.O., Stetsyk R. M. **Youth cyberhygiene on social platforms: from analysis of aim attacks to models of safe behavior** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.64 – 78.

A comprehensive study of the risks faced by the youth audience in modern social media spaces was conducted. A classification of social networks by age groups of users was presented, which allowed identifying priority attack vectors for each platform. Based on an empirical survey, critical gaps in the digital awareness of young people were identified. A three-tier pro-

tection model was developed, which includes system-wide, platform-oriented (Telegram, Instagram, TikTok) and network (Wi-Fi security) recommendations. The proposed educational and behavioral approach shifts the emphasis from purely technical means of protection to the formation of active digital resilience of the user.

Bib. 9, table. 2.

UDC 533.9

Zimoglyad A.Yu., Guda A.I., Redchyts D.O. **Principles and solutions for creating power and measurement equipment for plasma actuator research** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.79 – 88.

The article describes the design of a regulated high alternating voltage source with frequency control and the ability to measure the output current and voltage. The circuits and their description, design features are given.

A series of experiments were conducted to determine the operability of all its elements and modules. The design has shown its operability and can be used in a series of laboratory studies on controlling plasma actuators.

Bibl. 6, fig. 8.

UDC 681.5:637.133.7.03

Dukach A.Yu., Rudakova H.V., Polishchuk V.M. **Analysis of control methods for thermal processing of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.89 – 98.

The paper examines the features of the process of heat treatment of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves aimed at preserving their quality and safety for a long time. An analysis of existing methods of controlling the processes of heat treatment of canned fruits and vegetables in vertical autoclaves is carried out. The problems of using traditional proportional-integral-differential (PID) controllers are considered, due to the significant thermal inertia of the object and the complexity of setting it up for different types and masses of loading. Promising approaches to automation are analyzed, in particular model-based predictive control (MPC), which allows optimizing the process directly according to the target indicator of accumulated microbiological lethality (F0) taking into account technological limitations. Special attention is paid to the possibilities of using intelligent methods, such as adaptive fuzzy controllers (Fuzzy-PID) and artificial neural networks (ANN), which perform the function of virtual "soft sensors" for predicting the temperature inside the container. It was found that the use of standard algorithms for such products leads to significant errors in the calculations of accumulated lethality and, as a result, to thermal damage to raw materials (digestion). The results of the analysis substantiate the need to transition to hybrid intelligent control systems to ensure energy efficiency, compensate for the nonlinearity of heat exchange processes and preserve the nutritional value of complex heterogeneous products.

Bibl. 7, ill. 2.

UDC 004.021, 004.042, 004.048, 004.3, 004.9

Spodynets O., Bozhukha L. **Research into technologies and development of artificial intelligence-based device control system** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.99 – 107.

The article is devoted to the development and implementation of an intelligent control system for an FPV device, which is capable of performing autonomous homing to a target in the event of loss of communication with the operator. The relevance of the research is due to the widespread use of FPV devices and the need to overcome their key drawback - dependence on stable radio communication.

Bibl. 9, ill. 4, table 1.

UDC 004.93:681.5.015

Polyvoda O. V., Nazmieiev I. O. **Intelligent method for moving object identification based on feature clustering in the mel-frequency cepstral domain** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.108 – 119.

An intelligent method for identifying moving objects based on Mel-frequency cepstral analysis and K-means clustering has been developed. The authors propose a transition from vulnerable amplitude-based methods to the analysis of features in the cepstral domain. The methodology includes Short-Time Fourier Transform, psychoacoustic filtering, and feature decorrelation to form a unique digital fingerprint. Effective segmentation of the approach, passage, and departure phases of the object has been experimentally confirmed. The method is characterized by invariance to volume fluctuations and high computational speed, enabling its integration into real-world industrial automation systems and intelligent transportation monitoring systems in real-time.

Bibl. 6, Fig. 4.

UDC 621.74:621.9.048.4:669.295

Adzhamsky S.V., Kononenko G.A., Podolskyi R.V., Badyuk S.I., Podolska O.A. **Effect of volume energy density (VED) on the porosity and mechanical properties of Inconel 718 alloy manufactured by laser melting in a powder layer** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.120 – 129.

The work investigates the effect of volumetric energy density (VED) on the porosity and mechanical properties of Inconel 718 alloy manufactured by laser powder bed fusion (LPBF). Samples were obtained at two VED values of 48.7 and 57.6 J/mm<sup>3</sup> under the condition of ensuring a constant high relative density of 99.8%. It was found that at the same density, the nature of porosity differs depending on VED: at a higher VED, a larger number of small pores are observed, while at a lower VED, single defects of larger size are observed. It is shown that the change in VED has practically no effect on the strength, but significantly affects the plastic characteristics. The obtained results confirm the need for comprehensive optimization of LPBF modes taking into account the morphology of defects and mechanical properties, and not only the relative density of the material.

Bibl. 12, ill. 3, tabl. 2.

UDC 528.8:004.8

Honcharov O., Udovyyk I., Hnatushenko Vik. **Prompt engineering for zero-shot land cover classification using multimodal language models on Sentinel-2 imagery** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.130 – 147.

An approach to prompt engineering for multimodal language models (VLMs) is developed to improve the accuracy of zero-shot land cover classification on Sentinel-2 imagery. The phenomenon of spurious classification based on segmentation mask color (color leakage) is identified and analyzed. A protocol consisting of four mandatory rules is proposed, which eliminates this effect and increases structured output correctness (FCR) from  $\approx 60\%$  to  $97\%$ .

Refs. 21, Figs. 2, Tabs. 7.

UDC 628.511:620.9

Skoromnyi A.L. **Regularities of formation of total energy expenditures of pulse-jet bag filters at the stages of manufacturing and operation** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.148 – 160.

The paper analyzes energy consumption throughout the lifecycle of pulse-jet regenerated bag filters (PJBF) for flue gas dedusting at Ukrainian mining-metallurgical enterprises over 30 years. Based on data from SE "UkrSTC 'Energostal'," dependencies of filtration area, mass, and compressed air consumption on productivity were derived, determining energy expenditures for metal production, housing and mechanical equipment construction, filter bags manufacturing, fan operation, and compressor work. It was found that annual operational costs equal production costs, revealing key factors of total energy intensity and new optimization approaches for total energy expenditures.

Ref. 16, ill. 5.

UDC 004.738.5+025.4.036:378

Prokofieva K., Reshetilova O., Savchenko S. **Modern information technologies for processing and searching digitized documents in the education of students of the specialty B 13 "Library, information and archival affairs"** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.161 – 174.

The article examines the processes of digitization of documentary heritage and the creation of electronic collections within library and archival institutions. Special attention is paid to the classification of documents subject to digitization, including unique materials, archival and library holdings, manuscripts, highly demanded documents, and materials available in limited quantities. Digitization of such documents is considered an effective approach to preserving original sources while simultaneously providing broader access to information resources. The study describes the technological stages of creating digital copies, including scanning, technical processing of images, quality control, and storage of digital files. Particular emphasis is placed on the creation of preservation copies intended for long-term storage as well as user-oriented electronic versions designed for public access.

Ref. 6, ill. 4.

UDC 621.928.23

Havrikov V., Buhrova T. **Local supply of modifying components to the vibration compaction zone of a concrete mixture** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.175 – 183.

The article considers a structural and technological solution for a system of local supply of cement slurry or modifying components into the vibration compaction zone of a concrete mixture, which combines the mechanical action of an internal vibrator with the targeted introduction of an active liquid phase. The composition and operating principle of the system are substantiated. The system involves preparing a homogeneous liquid composition, supplying it by a pump through a pressure line, and injecting it through the nozzle jets directly into the zone of intensive compaction of the concrete mixture. It is shown that this solution makes it possible to improve the uniformity of binder or additive distribution in the local volume of the mixture, enhance aggregate wetting, reduce porosity, and prevent the formation of dry or insufficiently compacted areas.

Refs. 9, Fig. 1.

UDC 004.415.5:006.3

Moskalenko M.L. **Textual API description standard as a tool for improving software testing quality** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.184 – 200.

The article addresses the absence of a unified standard for plain-text API endpoint descriptions in corporate documentation systems. An analysis of four current ISTQB syllabuses identified a normative gap regarding minimum content requirements for informal specifications. The proposed MADS standard provides a ten-field template organised into identification, input data, output data, and security blocks. Evaluation across three REST endpoints using five coverage metrics demonstrated an increase in average coverage from 18.7% to 100%. The role of MADS as a structural prerequisite for RAG pipelines and MCP-based LLM test generation architectures is substantiated.

Ref. 30, fig. 2, tabl. 7.

UDC 004.415:004.82:681.51:621.31

Kotov I.A., Shvets D.V., Karabut N.O. **Software implementation of mathematical models for production-rule knowledge bases in power system dispatch control** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.201 – 212.

The article investigates intelligent systems based on knowledge bases designed to support power system dispatch control under severe time constraints. Management efficiency is ensured by preprocessing topology and state data, as well as by situational modeling methods. To recognize and classify emergency situations, the study proposes a production-rule-based knowledge representation grounded in the Petri net framework. This approach enables the generation of consistent, logical decision-making models that account for parallelism. The knowledge base is constructed using parameter training sets obtained from factorial design matrices. The developed integrated model supports planning emergency control measures across regional grids.

Ref. 11, fig. 3.

UDC 621.929.7:666.97.031

Nesterenko M., Nesterenko T., Anishchenko A., Pimonov I. **Study of the blade installation angle of a forced-action mixer with a vertical shaft in the “mixer — concrete pump” system** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.213 – 224.

The article considers the influence of the blade installation angle of a forced-action mixer with a vertical shaft on the process of concrete mixture mixing in the “mixer — concrete pump” technological system. The main attention is paid to ensuring mixture homogeneity, uniform distribution of components in the working chamber, and the formation of stable rheological properties required for the subsequent supply of material by a concrete pump.

The obtained results can be used to substantiate the rational blade installation angle, modernize forced-action mixers with a vertical shaft, and improve the stability of concrete mixture supply by a concrete pump.

Refs. 9, Fig. 17.

UDC 004.896

Protsenko M.I., Maslii R.V. **Priority Gossip synchronization method for distributed data in a group of unmanned aerial vehicles** // System technologies. № 4(165) - Dnipro, 2026.- P.225 – 233.

A priority gossip synchronization method for distributed data in a UAV swarm is considered. A node priority function is proposed that accounts for the battery level, communication channel quality, and data relevance of each agent. Unlike the standard gossip protocol, the exchange partner is selected with probability proportional to the priority function value. Computer simulation was conducted for swarms of 50 to 200 UAVs. A convergence improvement of 2.1–5.6% compared to the standard gossip protocol is demonstrated.

Ref. 17, fig. 3, tabl. 1.

**Системні технології**  
**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**  
Випуск 4 (165)

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

Відповідальний секретар та технічний редактор: к.т.н., доц. К.Ю. Островська

---

Здано до набору 29.04.2026. Підписано до друку 30.04.2026.

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

Умов. друк арк. – 17,9. Обл.–видавн. арк. – 15,69.

Тираж 300 прим. Замовл. – 04/26

---

Український державний університет науки і технологій,  
ННІ «Дніпровський металургійний інститут»,  
кафедра Інформаційних технологій та систем: ІВК «Системні технології»  
49600, Дніпро, а/с 493

<http://journals.nmetau.edu.ua/index.php/st>

Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації:

**Серія КВ № 8684 від 23 квітня 2004 рік**

## **Редакційна колегія**

**Селівьорстова Тетяна Віталіївна**  
(*головний редактор*)

доцент, кандидат технічних наук

**Гнатушенко Вікторія Володимирівна**  
(*заступник головного редактора*)

професор, доктор технічних наук

**Островська Катерина Юріївна**  
(*відповідальний секретар*)

доцент, кандидат технічних наук

## **Члени редакційної колегії**

**Бердник Михайло Геннадійович**  
професор, доктор технічних наук

**Гвоздева Ірина Маратівна**  
професор, доктор технічних наук

**Гнатушенко Володимир Володимирович**  
професор, доктор технічних наук

**Редчиць Дмитро Олександрович**  
професор, доктор технічних наук

**Svyetlichnyy Dmytro**  
Ph.D, Professor, Full Professor

**Heipke Christian**  
Dr.-Ing., Professor

**Шинкаренко Віктор Іванович**  
професор, доктор технічних наук

**Shults Roman**  
DSc, PhD, Associate Professor

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський металургійний інститут», Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський металургійний інститут», Україна

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський металургійний інститут», Україна

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна

Національний університет «Одеська морська академія», Україна

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна

Інститут транспортних систем і технологій НАНУ, Україна

Akademia Górniczo-Hutnicza  
im. Stanisława Staszica, Poland

Leibniz University Hannover, Germany

Український державний університет науки і технологій, ННІ «Дніпровський інститут інфраструктури і транспорту», Україна

Interdisciplinary Research Center  
for Aviation and Space Exploration,  
Kingdom of Saudi Arabia