Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Національний науковий центр «Інститут метрології»
м. Харків

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених

«Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об’єктах»

Згідно з планом проведення міжнародних, всеукраїнських науково-практичних та науково-методичних конференцій і семінарів на базі Харківського національного автомобільно-дорожнього університету у 2026 році (Посвідчення УкрІНТЕІ № 998 від 11 грудня 2025 року)

3 листопада 2026 р.
м. Харків, Україна

Організаційний комітет конференції

Холодов Антон Павлович	- голова організаційного комітету, ректор ХНАДУ (м. Харків)
Дмитрієв Ілля Андрійович	- проректор з наукової роботи ХНАДУ (м. Харків)
Єфименко Олександр Володимирович	- декан механічного факультету ХНАДУ (м. Харків)
Богатов Олег Ігоревич	- відповідальний секретар конференції, завідувач кафедри метрології та безпеки життєдіяльності ХНАДУ (м. Харків)

ЗМІСТ

Секції	Стор.
Секція 1 Вимірювальні інформаційні технології на техногенно небезпечних об'єктах	
Бражник А. О., Полярус О. В. ЗМЕНШЕННЯ ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ШЛЯХОМ РАСТЕРИЗАЦІЇ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ СИГНАЛІВ	7
Букир Іван, Коваль О. А. МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ВИЯВЛЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ АНОМАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ДАНИХ У РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ	10
Зєкунова Аліна, Коваль А. О. МЕТОД ВІДНОВЛЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ВІДМОВІ ОКРЕМИХ КАНАЛІВ ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	18
Іщенко Н. А., Грайворонська І. В. ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	23
Куроп'ятник М. С., Полярус О. В. ВИМОГИ ДО ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВХІДНИХ І ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ ПРИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СИСТЕМ	26
Моторна О. А., Медведовська Я. С. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА КОМПЕНСАЦІЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ БЕЗПЕКИ	29
Рояка Олексій, Коваль О. А. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МЕТОД АДАПТИВНОГО ЗЛИТТЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ	34
Сальнікова С. А., Медведовська Я. С. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ САМОНАЛАШТУВАННЯ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ ТА СИЛИ СТРУМУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ	41
Сафарян Вадим, Коваль А. О. ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ В БАГАТОКАНАЛЬНІЙ РОЗПОДІЛЕНІЙ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ	46
Шабленко Денис, Коваль А. О. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ЗА ЧАСОВИМИ ПАТЕРНАМИ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК	51
Секція 2 Пристрої і методи вимірювання та контролю параметрів потенціально небезпечних процесів. Метрологічне забезпечення безпеки життєдіяльності	
Вдовіна Катерина, Коваль А. О. МЕТОД САМОДІАГНОСТУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ДАТЧИКІВ ЗА БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИМИ ПАТЕРНАМИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ І СЛУЖБОВИХ ДАНИХ	61
Волков Максим, Коваль О. А. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОСТОРОВОЇ ВІДСТАНІ МІЖ ВИМІРЮВАЛЬНИМИ КАНАЛАМИ НА ДОСТОВІРНІСТЬ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ПРОТЯЖНИХ КОНСТРУКЦІЙ	68
Галкіна Тетяна, Коваль О. А. МЕТОД КОМПЕНСАЦІЇ ЧАСОВОЇ НЕУЗГОДЖЕНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЇ	73

Макляк Василь, Коваль О. А. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОВЖИНИ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ НА ПОХИБКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ДЕФОРМАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ	78
Мельник Юрій, Коваль О. А. МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА МЕХАНІЧНОГО ЗБУРЕННЯ ЗА ЧАСОВИМИ ЗАТРИМКАМИ СИГНАЛІВ РОЗПОДІЛЕНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ	83
Осмолович Євгеній, Коваль А. О. МЕТОД АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЗБОРУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ДАНИХ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ	88
Рудаков С. В., Грицюк Д. Б. МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ЯК ОСНОВА ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННО-ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ	95
Сафарян Валерій, Коваль А. О. ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ НА ВІДНОВЛЕННЯ ПРОСТОРОВОГО ПОЛЯ ФІЗИЧНОЇ ВЕЛИЧИНИ	99
Сафарян Карен, Коваль А. О. МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ЗОН ЗМІНИ МЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ДАНИМИ ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ	106
Секція 3 Проблемні питання прийняття рішень	
Bugaychuk N. R., Tychkov V. V., Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V. FEATURES OF NON-CONTACT MEASUREMENT ON A ROLLING MILL: TEMPERATURE, SPEED, VIBRATIONS, AND AXIS DISPLACEMENT	114
Korshun Ye. A., Tychkov V. V., Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V. MAIN IONIC POLLUTANTS OF WATER RESOURCES AND REGULATORY APPROACHES TO ASSESSING THEIR CONCENTRATIONS	120
Tychkova N. B., Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V., Tychkov V. V. SURROGATE MODEL OF A PROBE WITH ACCUMULATION OF ADDITIONAL INFORMATION FOR MULTI-FREQUENCY TESTING	126
Захарченко О. А., Петрукович Д. Є. МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕКОНСТРУЙОВАНИХ ПРОСТОРОВИХ ПОЛІВ ВИМІРЮВАНИХ ПАРАМЕТРІВ	133
Храпський В. В., Петрукович Д. Є. ОПТИМАЛЬНЕ РОЗМІЩЕННЯ ДАТЧИКІВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ПРОСТОРОВОГО ПОЛЯ ПАРАМЕТРА	139
Tychkov D. V., Bondarenko, Yu. Yu., Pinchuk A. M. DECISION-MAKING CHALLENGES IN OPTIMIZING THE ENERGY EFFICIENCY OF RECONNAISSANCE UNMANNED AERIAL VEHICLES USING DATA MINING WORKSPACES	145
Секція 4 Ліквідація наслідків аварій на техногенно небезпечних об'єктах	
Іванісов М. О., Роянов О. М. НЕОБХІДНІСТЬ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ОПЕРАТИВНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ ХІМІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ ТА НАСЕЛЕННЯ	152
Кремінська П. В., Роянов О. М. ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕХНОГЕННОЇ НЕБЕЗПЕКИ УКРАЇНИ НА ЛЮДИНУ ТА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ В СУЧАСНИХ УМОВАХ	156
Михайлова С. А., Богатов О. І. ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ ХІМІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ ТА НАСЕЛЕННЯ	160
Пасічник Костянтин**,** Кравцов Михайло СПЕЦИФІКА ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ АВАРІЙ НА АЕС ТА ОБ'ЄКТАХ ВИКОРИСТАННЯ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГІЇ	167

Пивовар Дмитро, Кравцов Михайло МЕТОДИ ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКІВ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ	172
Табуненко В. О., Воловодюк А. С. АНАЛІЗ ТА ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТРАВМАТИЗМУ В ЗБРОЙНИХ СИЛАХ УКРАЇНИ	176
Табуненко В. О., Сальник О. В. ТАЄМНА ЗБРОЯ ТА ЇЇ НАСЛІДКИ	180
Богомол Д. С., Черепньов І. А., Єрмаков О. І. ОЦІНКА СУЧАСНОГО СТАНУ З ІНФЕКЦІЙНИМИ ХВОРОБАМИ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ	183
Лактіонов В. А., Черепньов І. А., Макогон О. А. ЕТАПИ СТАНОВЛЕННЯ І СУЧАСНИЙ СТАН СИСТЕМИ ЦИВІЛЬНОЇ ОБОРОНИ НА ТЕРИТОРІЇ СПОЛУЧЕНИХ ШТАТІВ АМЕРИКИ	188
Ткачова С. В., Черепньов І. А., Ткачова О. І. ОЦІНКА СУЧАСНОГО СТАНУ ГІДРОДИНАМІЧНИХ СПОРУД У СВІТІ	193
Шаповаленко Оксана, Кравцов Михайло ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ПІРОТЕХНІЧНИХ РОБІТ ПІД ЧАС ЛІКВІДАЦІЇ АВАРІЙ	198

Секція 1

Вимірювальні інформаційні технології на техногенно небезпечних об’єктах

Бражник А. О.
студентка магістратури
Науковий керівник: д.т.н., проф. ***Полярус О. В.***
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ЗМЕНШЕННЯ ВИПАДКОВИХ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ШЛЯХОМ РАСТЕРИЗАЦІЇ ФАЗОВИХ ПОРТРЕТІВ СИГНАЛІВ

Якість вимірювальної інформації на техногенно небезпечних об’єктах визначається рівнем випадкових похибок та невизначеністю вимірювань, значну частину яких створює адитивний шум. Класичні апаратні (екранування, заземлення, фільтри) та програмні (усереднення, цифрова фільтрація, надлишкова дискретизація) методи зменшення шуму працюють переважно у часовій області, де розділити шум і корисний сигнал важко. Перспективним є перенесення оброблення у просторову область, де сигнал і шум займають різні ділянки зображення.

Реалізацію випадкового процесу подамо як суму детермінованого сигналу та білого гауссівського шуму:

$$x(t) = s(t) + n(t), \qquad (1)$$

де $s(t)$ – сума гармонік;

$n(t)$ – шум.

Часову реалізацію відображають у двовимірний фазовий портрет (ФП) за допомогою вбудовування Такенса [1, 2]: формується вектор $[x(t), x(t + \tau)]$, де затримка τ найчастіше прив’язується до чверті періоду найповільнішої гармоніки. Корисний сигнал зосереджується у визначеній частині площини, тоді як шум «розмазується» майже по всій площині. Для цифрового оброблення ФП растеризують на координатну сітку $M \times M$, а пікселі

поділяють на сигнальні, шумові та комбіновані (у вузол потрапляють точки і сигналу, і шуму).

У моделюванні використано суму трьох гармонік (1,5; 4,1 та 6,2 Гц з амплітудами 1,0; 0,7 та 0,5), частоту дискретизації 1000 Гц, тривалість 6 с і відношення сигнал/шум 10 дБ. Показано, що сигнальні пікселі містять 57,2 % енергії процесу, шумові – 14,1 %, комбіновані – 28,7 %. Операція растеризації є нелінійною: принцип суперпозиції виконується лише у 3,51 % точок, оскільки шум зсуває точки у сусідні вузли сітки.

У реальних вимірюваннях опорні пікселі відсутні, тому потрібне «сліпе» розділення пікселів. Порівняно методи CCL [3], оцінки фрактальної розмірності, порогової фільтрації, Отсу [4], K-means та ентропійний метод Шеннона [5]. Надійність оцінювали коефіцієнтом промахів:

$$Miss\ Rate = FN / (FN + TP), \qquad (2)$$

де FN – хибнонегативні,

TP – істинно позитивні результати.

Найменший коефіцієнт промахів для сигнальних пікселів (близько 11-12 %) забезпечує однопороговий метод Отсу, а двопороговий ентропійний метод найкраще визначає шумові пікселі (коефіцієнт промахів близько 35 %).

Після видалення шумових пікселів корисний сигнал відновлюють розв’язанням оберненої задачі, яка є некоректною за Адамаром, тому застосовують регуляризацію з урахуванням міжпіксельних локальних кореляцій [6]. Коефіцієнт кореляції відновленого сигналу з детермінованим становить 0,83 для методу Отсу (RMSE = 0,489) та 0,79 для ентропійного методу (RMSE = 0,541).

Моделювання методом Монте-Карло (100 випробувань, M від 4 до 90) показало, що розмір сітки визначає компроміс між точністю відтворення форми ФП та якістю класифікації: найкраща подібність за коефіцієнтом Жаккара досягається при $M \approx 7$ (крок сітки $\approx 3{,}85\sigma$), а найкраща класифікація

пікселів – при $M \approx 18$ (крок сітки ≈ 1,3σ), де σ – СКВ шуму (рис. 1). Тому доцільно працювати у діапазоні $M = 7…18$. Видалення близько 73 % шумових пікселів підвищує коефіцієнт Жаккара приблизно на 23 %.

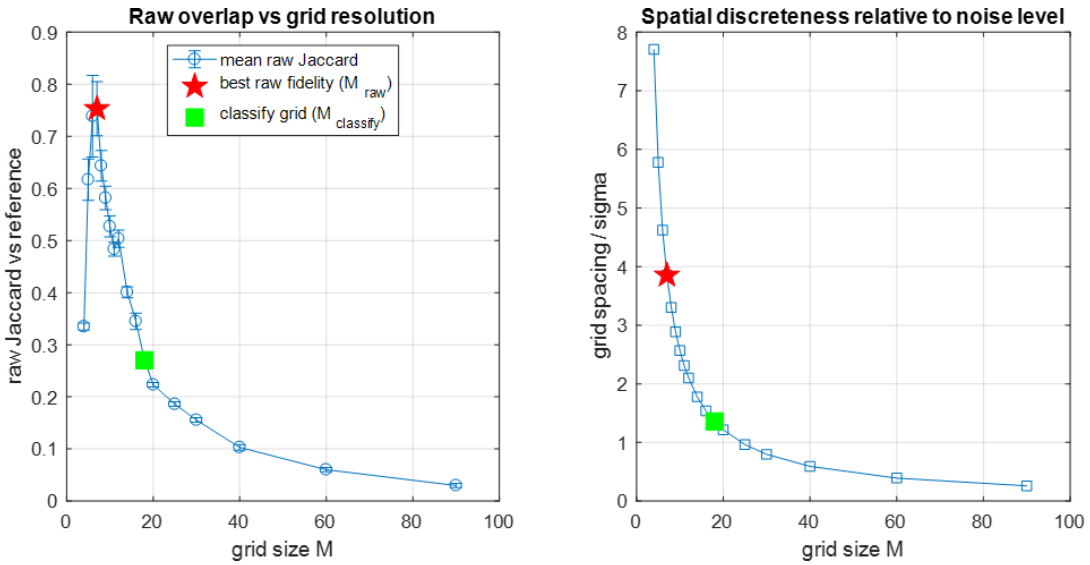


Рис. 1 – Залежність коефіцієнта Жаккара (зліва) та відношення кроку сітки до σ (справа) від розміру сітки M

Отже, перетворення сигналу у зображення фазового портрету з наступною класифікацією пікселів дозволяє зменшити вплив адитивного шуму та випадкових похибок вимірювання. Отримані результати є основою для кількісного оцінювання невизначеності вимірювань за типами А та Б на етапах перетворення сигналу в кваліфікаційній роботі.

Література:

1. Darbyshire A. G., Price T. J. Phase Portraits from Chaotic Time Series. Fractals and Chaos / ed. by A. J. Crilly, R. A. Earnshow, H. Jones. New York : Springer, 1991. DOI: 10.1007/978-1-4612-3034-2_13

2. Gutman Y. Takens' embedding theorem with a continuous observable. Ergodic Theory: Advances in Dynamical Systems / ed. by I. Assani. Berlin ; Boston : De Gruyter, 2016. P. 134–141. DOI: 10.1515/9783110461510-006

3. Shapiro L. G. Connected Component Labeling and Adjacency Graph Construction. Machine Intelligence and Pattern Recognition. 1996. Vol. 19. P. 1-30. DOI: 10.1016/S0923-0459(96)80011-5

4. Sha C., Hou J., Cui H. A robust 2D Otsu's thresholding method in image segmentation. Journal of Visual Communication and Image Representation. 2016. Vol. 41. P. 339-351. DOI: 10.1016/j.jvcir.2016.10.013

5. Bhowmik M., Sarkar A., Das R. Shannon entropy based fuzzy distance norm for pixel classification in remote sensing imagery. Proc. of the 2015 Third Int. Conf. on Computer, Communication, Control and Information Technology (C3IT). Hooghly, India, 2015. P. 1-6. DOI: 10.1109/C3IT.2015.7060200

6. Park J., Park D.-C., Marks R. J., El-Sharkawi M. A. Recovery of image blocks using the method of alternating projections. IEEE Transactions on Image Processing. 2005. Vol. 14, No. 4. P. 461-474. DOI: 10.1109/TIP.2004.842354

***Букир Іван**, студент ММ-61-25*

*Науковий керівник: **Коваль О. А.***

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО ВИЯВЛЕННЯ ТА ВІДНОВЛЕННЯ АНОМАЛЬНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ДАНИХ У РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Розподілені інформаційно-вимірювальні системи формують значні масиви просторово та часово пов’язаних вимірювальних даних. Порушення роботи окремого датчика, каналу передавання або програмного засобу збору даних може призводити до імпульсних викидів, дрейфу, пропусків, зависання показів та інших аномалій. Використання таких значень без попереднього

контролю погіршує достовірність подальшого оцінювання стану об’єкта. Водночас просте вилучення підозрілих відліків створює нову проблему – неповноту даних. Тому актуальною є спільна задача виявлення аномалії та відновлення вимірювальної інформації з використанням інформаційної надлишковості розподіленої системи.

Актуальність такого підходу підтверджується сучасною стандартизацією якості сенсорних даних. ISO 8000-210:2024 визначає для цифрових сенсорних потоків, зокрема, зміщення, дрейф, імпульсні викиди, шум, втрату даних, зависання та часові неузгодженості. ISO 8000-220:2025 встановлює кількісні міри якості сенсорних даних, а ISO/TS 8000-230:2026 уже безпосередньо розглядає процес очищення, виявлення та виправлення аномалій [1], [2], [3].

Мета роботи – розробити та дослідити метод інтелектуального виявлення і відновлення аномальних вимірювальних даних у розподіленій інформаційно-вимірювальній системі на основі спільного використання просторової та часової інформаційної надлишковості.

У модельній системі використано сім просторово розподілених каналів, які спостерігають одне фізичне поле. Сигнали каналів не є тотожними: вони мають невеликі просторові зміщення, різні рівні випадкового шуму та локальні відмінності. Це принципово важливо, оскільки відновлення даних простим копіюванням показів сусіднього датчика не враховувало б просторової неоднорідності поля.

Для кожного відліку контрольованого каналу формується прогноз на основі двох джерел інформації:

$$\hat{x}_j(k) = \gamma \,\mathrm{med}_{i \neq j}\{x_i(k)\} + (1-\gamma)\,\mathrm{med}\{x_j(k-d), x_j(k+d)\}_{d=1}^{L}, \quad (1)$$

де $\hat{x}_j(k)$ – прогнозоване значення j-го каналу в момент k;

$x_i(k)$ – одночасний результат іншого просторового каналу;

γ – вага просторової складової;

L – напівширина локального часового вікна;

$\mathrm{med}(\cdot)$ – медіанний оператор.

Перша складова використовує просторову надлишковість, а друга – локальну часову структуру самого каналу. Зміною γ можна адаптувати метод до ступеня просторової однорідності вимірюваного поля.

Для виявлення аномалії використовується робастний нормований залишок:

$$A_j(k) = \frac{|r_j(k) - \mathrm{med}(r_j^{(0)})|}{1.4826\ \mathrm{med}\left(|r_j^{(0)} - \mathrm{med}(r_j^{(0)})|\right) + \varepsilon}, \qquad r_j(k) = x_j(k) - \hat{x}_j(k), \quad (2)$$

де $A_j(k)$ – показник аномальності;

$r_j(k)$ – залишок між виміряним і прогнозованим значеннями;

$r_j^{(0)}$ – вибірка залишків для штатної ділянки;

ε – мале додатне число.

Відлік вважається підозрілим, якщо $A_j(k) > A_{\text{пор}}$. Для пропущених значень ознака аномалії встановлюється безпосередньо. Робастний масштаб через медіанне абсолютне відхилення обрано для зменшення впливу одиничних великих відхилень на сам поріг виявлення.

У чисельному експерименті змодельовано 420 часових відліків семи каналів. У четвертому каналі штучно сформовано три типи порушень: імпульсні аномалії, пропуск послідовності даних та поступовий дрейф. Додатково модель дозволяє вводити зависання іншого каналу, що створює складніші умови для використання просторової надлишковості. Після виявлення підозрілий відлік замінюється не довільним інтерпольованим значенням, а просторово-часовим прогнозом $\hat{x}_j(k)$.

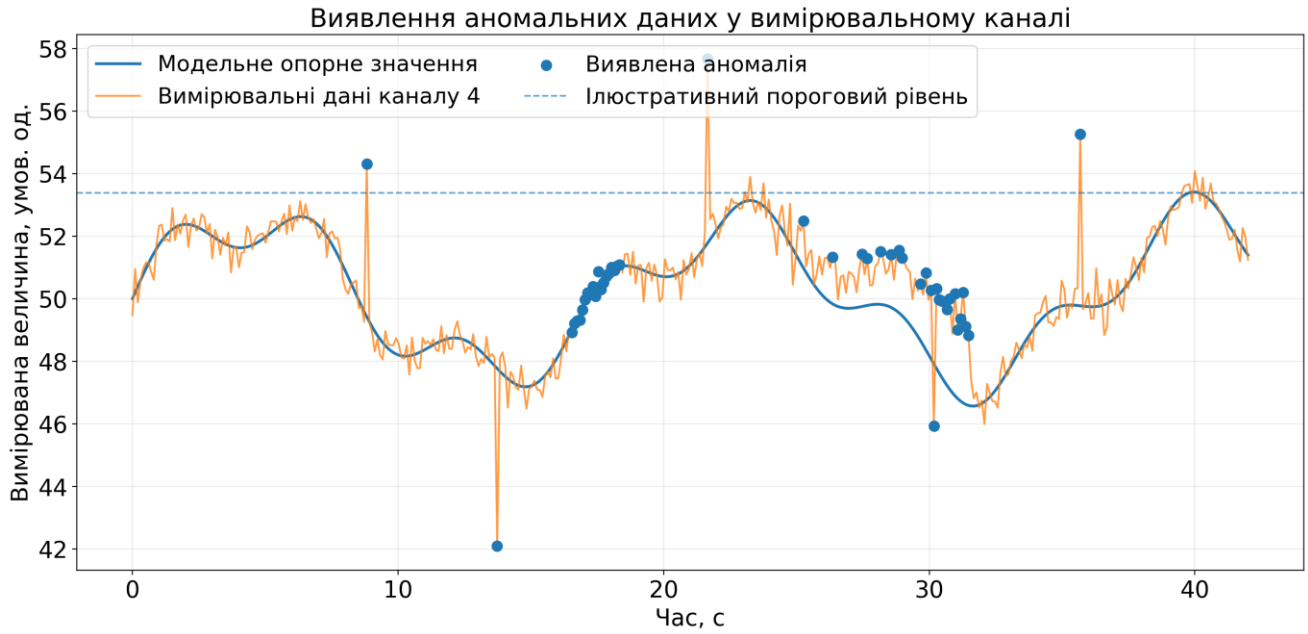


Рисунок 1 – Результат виявлення аномальних вимірювальних даних у контрольованому каналі

На рис. 1 показано модельне опорне значення, початкові вимірювальні дані четвертого каналу та відліки, класифіковані алгоритмом як аномальні. Для базової реалізації виявлено 46 аномальних або пропущених відліків із 420. Імпульсні викиди формують короткочасні значні відхилення, тоді як дрейф проявляється поступовим систематичним відходом сигналу від просторово-часового прогнозу. Пропуск даних є окремим типом аномалії, для якого числовий залишок безпосередньо не обчислюється.

Важливо, що пороговий критерій застосовується не до абсолютного значення вимірюваної величини, а до відхилення від очікуваного просторово-часового патерну. Тому закономірна зміна фізичного процесу, яка одночасно спостерігається більшістю каналів, не повинна автоматично розглядатися як аномалія. Саме ця властивість є особливо важливою для розподілених систем, де вимірювана величина може суттєво змінюватися у часі.

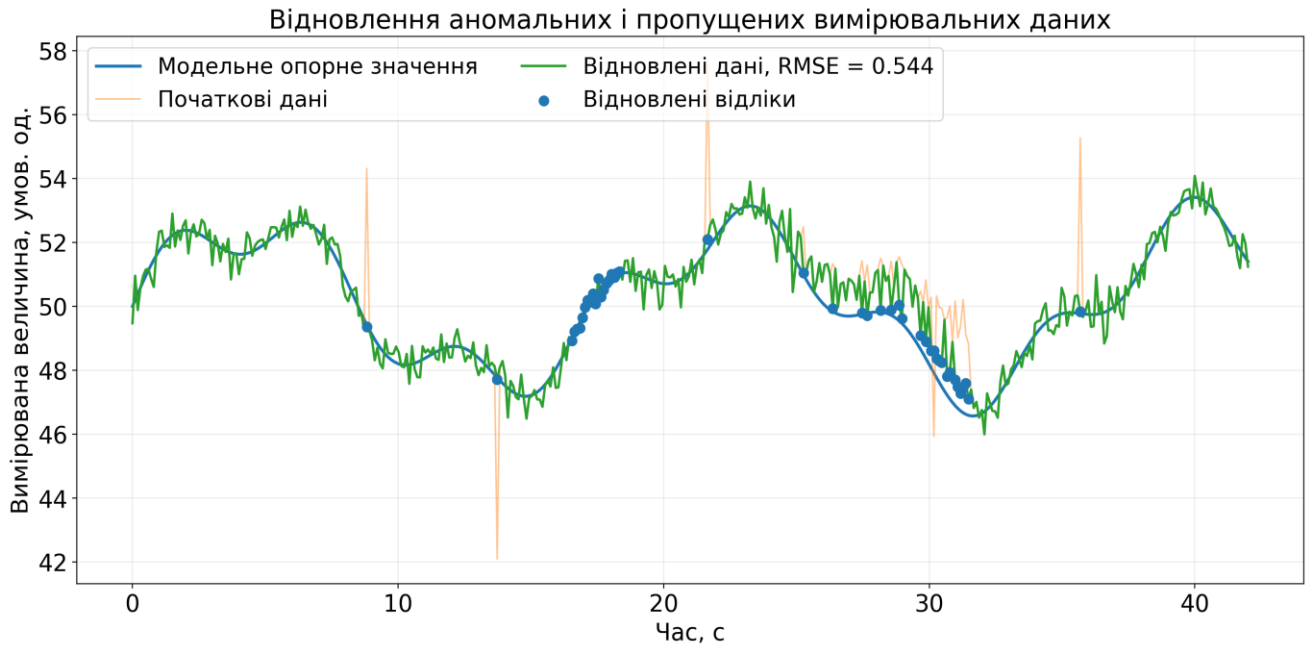


Рисунок 2 – Результат відновлення аномальних і пропущених вимірювальних даних

На рис. 2 показано результат заміни виявлених аномальних відліків просторово-часовими оцінками. Для початкових наявних даних четвертого каналу середньоквадратична похибка відносно модельного опорного сигналу становить приблизно 0,943 умовної одиниці. Після виявлення та відновлення вона зменшується до 0,544, тобто приблизно на 42,3 %. Середня абсолютна похибка відновленої реалізації становить близько 0,404 умовної одиниці. Ці результати характеризують конкретний модельний експеримент і не є універсальною оцінкою точності методу.

Дослідницька частина роботи спрямована на встановлення умов, за яких відновлення залишається достовірним. Якщо коефіцієнт γ наближається до одиниці, метод переважно довіряє сусіднім просторовим каналам. Це доцільно для однорідного поля та коротких пропусків, але може збільшити похибку за значного просторового градієнта. За малого γ більшу роль відіграє локальна часова поведінка самого каналу, що є корисним за просторової неоднорідності, але менш ефективним під час довготривалої втрати даних.

Другим важливим параметром є поріг $A_{\text{пор}}$. Його зменшення підвищує чутливість до слабкого дрейфу, але одночасно збільшує ризик класифікації нормальних флуктуацій як аномальних. Підвищення порога зменшує кількість хибних спрацювань, проте слабкі аномалії можуть залишитися невиявленими. Отже, поріг доцільно визначати не довільно, а за статистикою штатних залишків і вимогами до допустимого ризику помилкового рішення.

Розроблений інтерактивний блокнот дозволяє змінювати амплітуду та кількість імпульсних аномалій, величину дрейфу, тривалість пропуску, рівень шуму каналів, пороговий коефіцієнт, вагу просторової надлишковості та реалізацію випадкового процесу. Це дає можливість вивчити не лише один результат, а область працездатності методу.

Сучасні підходи до відновлення сенсорних часових рядів дедалі частіше використовують просторово-часові залежності та механізми уваги. Наприклад, у роботах 2025 року досліджуються моделі відновлення пропущених багатовимірних часових рядів із використанням просторової самоуваги [4], а також відновлення промислових сенсорних даних за допомогою моделей самоуваги [5]. Для невеликої розподіленої інформаційно-вимірювальної системи запропонований робастний метод має перевагу інтерпретованості: можна безпосередньо встановити, за рахунок яких просторових і часових даних отримано відновлене значення.

Перспективним є розвиток методу в напрямі адаптивного вибору сусідніх каналів. У реальній просторово розподіленій системі не всі датчики однаково інформативні для відновлення конкретного каналу. Ваги доцільно визначати за відстанню між датчиками, поточною кореляцією, невизначеністю каналів та оцінкою просторового градієнта. Ще одним напрямом є формування інтервалу невизначеності для відновленого значення: результат реконструкції не повинен подаватися користувачу як звичайний виміряний відлік без ознаки того, що він був відновлений.

Остання вимога особливо важлива з метрологічної точки зору. Очищення даних не повинно приховувати факт їх модифікації. Доцільно зберігати початковий результат, ознаку типу аномалії, відновлене значення, використаний алгоритм і показник довіри. Така логіка добре узгоджується з ISO/TS 8000-230:2026, який розглядає очищення сенсорних даних як керований процес підвищення їх якості та містить методи виявлення й виправлення аномалій [3]. Водночас організацію процедур контролю, очищення та документування результатів доцільно розглядати як складову процесу управління якістю даних відповідно до процесної моделі ISO 8000-61:2016 [6]. Загальне трактування якості даних як сукупності характеристик, що визначають їх придатність до використання в заданих умовах, узгоджується також із моделлю якості даних ISO/IEC 25012:2008 [7].

Висновки. Запропоновано метод інтелектуального виявлення та відновлення аномальних вимірювальних даних, який використовує просторову надлишковість розподіленої системи та локальну часову структуру сигналу. Робастний показник дозволяє виявляти відхилення від очікуваного просторово-часового патерну, а прогнозне значення використовується для відновлення аномальних і пропущених відліків. У базовому модельному експерименті середньоквадратична похибка після відновлення зменшилася приблизно на 42 %. Подальші дослідження доцільно спрямувати на адаптивний вибір просторових сусідів, урахування невизначеності відновлених значень, розпізнавання типу аномалії та перевірку методу на даних реальної розподіленої інформаційно-вимірювальної системи.

Література:

1. ISO 8000-210:2024. *Data quality – Part 210: Sensor data: Data quality characteristics*. Geneva : International Organization for Standardization, 2024. URL: https://www.iso.org/standard/78914.html (дата звернення: 24.09.2026).

2. ISO 8000-220:2025. *Data quality – Part 220: Sensor data: Quality*

measurement. Geneva : International Organization for Standardization, 2025. URL: https://www.iso.org/standard/82611.html (дата звернення: 24.09.2026).

3. ISO/TS 8000-230:2026. *Data quality – Part 230: Sensor data – Guidelines for data cleansing*. Geneva : International Organization for Standardization, 2026. URL: https://www.iso.org/standard/89681.html (дата звернення: 24.09.2026).

4. Spatial Self-Attention Incorporated Imputation Algorithm for Severely Missing Multivariate Time Series. *Journal of Electronics & Information Technology*. 2025. DOI: 10.11999/JEIT250220. URL: https://jeit.ac.cn/en/article/doi/10.11999/JEIT250220 (дата звернення: 24.09.2026).

5. Self-Attention-Based Deep Learning for Missing Sensor Data Imputation in Real-Time Probe Card Monitoring. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 23. Art. 7194. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/25/23/7194 (дата звернення: 24.09.2026).

6. ISO 8000-61:2016. *Data quality – Part 61: Data quality management: Process reference model*. Geneva : International Organization for Standardization, 2016. URL: https://www.iso.org/standard/63086.html (дата звернення: 24.09.2026).

7. ISO/IEC 25012:2008. *Software engineering – Software product Quality Requirements and Evaluation (SQuaRE) – Data quality model*. Geneva : ISO/IEC, 2008. URL: https://www.iso.org/standard/35736.html (дата звернення: 24.09.2026).

Студентка ММ-21-25 ***Зєкунова Аліна***
Науковий керівник: к.т.н., доц. ***Коваль А. О.***
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

МЕТОД ВІДНОВЛЕННЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ ПРИ ВІДМОВІ ОКРЕМИХ КАНАЛІВ ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНОЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Просторово розподілена інформаційно-вимірювальна система складається з декількох вимірювальних каналів, які розміщені в різних точках об’єкта. Кожний канал вимірює значення фізичної величини у своїй точці. За результатами всіх каналів можна отримати уявлення про те, як ця величина змінюється вздовж усього об’єкта.

Під час роботи системи окремі канали можуть перестати передавати правильні дані або повністю вийти з ладу. Причиною може бути несправність датчика, пошкодження лінії зв’язку або відмова електронного обладнання. У такому випадку в загальному наборі вимірювань з’являються пропущені значення. Проблема відновлення таких даних є актуальною для розподілених сенсорних систем [1, 2]. Для її вирішення можуть застосовуватися різні способи – від простої інтерполяції до методів машинного навчання [2-4].

Мета роботи – дослідити можливість відновлення результатів вимірювання при відмові окремих каналів просторово розподіленої інформаційно-вимірювальної системи.

У роботі розглянуто модель ділянки довжиною 60 м. Вимірювальні канали розташовані через кожні 5 м. Фізична величина плавно змінюється вздовж ділянки. До результатів вимірювання додається невелика випадкова похибка.

Для дослідження штучно задається відмова трьох каналів, розташованих у точках 20 м, 25 м і 45 м. При цьому канали в точках 20 м і 25 м розташовані

поруч. Такий випадок є складнішим, тому що на певній ділянці втрачаються одразу два сусідні результати вимірювання.

Якщо значення фізичної величини між сусідніми точками змінюється плавно, втрачений результат можна приблизно визначити за двома найближчими працездатними каналами:

$$\hat{X}(x) = X_1 + \frac{x - x_1}{x_2 - x_1}(X_2 - X_1), \qquad (1)$$

де $\hat{X}(x)$ – відновлене значення;

X_1 і X_2 – результати вимірювання сусідніх працездатних каналів;

x_1 і x_2 – координати цих каналів;

x – координата каналу, для якого результат вимірювання втрачено.

Таким чином, значення для відмовленого каналу визначається за даними каналів, які продовжують працювати.

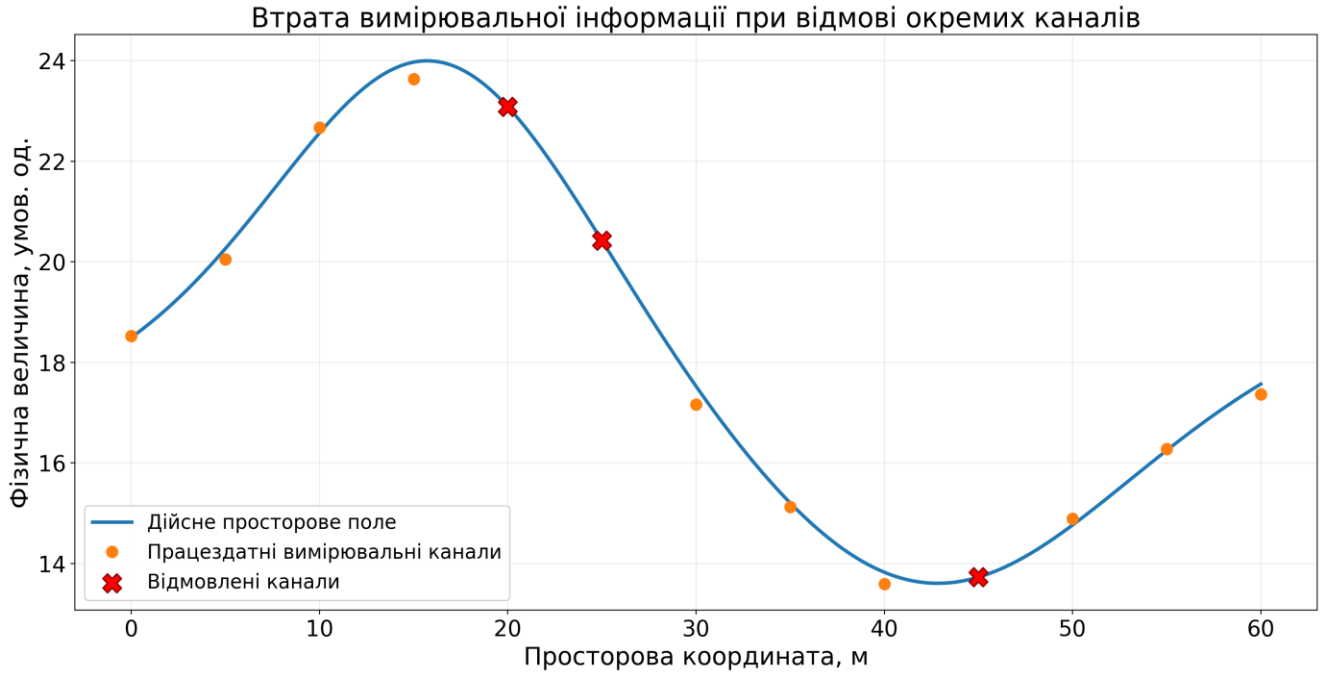


Рисунок 1 – Просторове поле та розташування відмовлених вимірювальних каналів

На рис. 1 показано просторову зміну фізичної величини та розташування вимірювальних каналів. Великими червоними маркерами позначено канали, які вважаються відмовленими. У цих точках система не має результатів безпосереднього вимірювання.

Добре видно, що більшість працездатних каналів продовжують описувати загальний характер зміни фізичної величини. Тому їх дані можна використати для приблизного визначення пропущених значень. Складнішою є ділянка від 20 м до 25 м, оскільки тут відмовили два сусідні канали. Відстань між найближчими працездатними каналами збільшується, тому точність відновлення може погіршуватися.

Подібний підхід можливий завдяки тому, що в просторово розподіленій системі сусідні канали вимірюють одну фізичну величину в близьких точках. Тому між їх результатами зазвичай існує певний зв’язок. Ця властивість використовується і в сучасних методах відновлення пропущених вимірювальних даних [1-4].

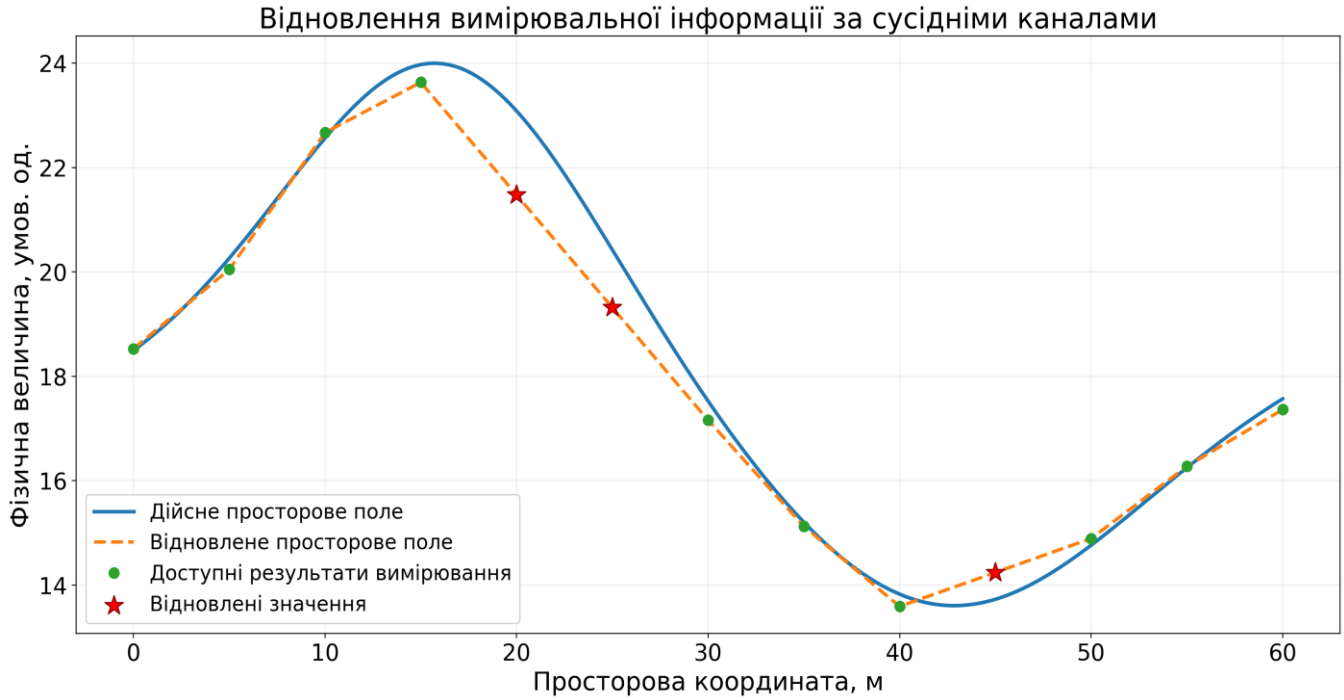


Рисунок 2 – Відновлення просторового поля та значень відмовлених каналів

На рис. 2 показано результат відновлення. Великі червоні зірки відповідають значенням, які були розраховані замість втрачених результатів вимірювання.

Для каналу в точці 20 м дійсне модельне значення становить приблизно 23,09 умовної одиниці, а відновлене – 21,48. У точці 25 м отримано відповідно 20,42 та 19,32 умовної одиниці. Для каналу в точці 45 м дійсне значення дорівнює приблизно 13,73, а відновлене – 14,24 умовної одиниці.

Середньоквадратична похибка для трьох відновлених значень становить приблизно 1,17 умовної одиниці. Найбільша похибка отримана для точки 20 м. Це можна пояснити тим, що поруч із цим каналом також відмовив канал у точці 25 м. У результаті для відновлення використовується інформація з більш віддалених точок.

Отже, на точність відновлення впливає не тільки кількість відмовлених каналів, але й їх розташування. Якщо відмовив один канал, а сусідні канали працюють, його значення можна відновити досить просто. Якщо одночасно відмовляють декілька сусідніх каналів, задача стає складнішою.

У більш складних системах для відновлення пропущених результатів можуть використовуватися статистичні методи та алгоритми машинного навчання [3-6]. Проте для початкового дослідження лінійне відновлення є зручним, оскільки його принцип легко пояснити та перевірити.

Всі дослідження проводились методом математичного моделювання на Python. Модель в інтерактивному режимі дозволяла змінювати відстань між вимірювальними каналами, рівень випадкової похибки та координати відмовлених каналів. Це дозволило порівняти випадок відмови одного каналу з випадком, коли одночасно відмовляють декілька сусідніх каналів.

Висновки. Проведене моделювання показало, що при відмові окремого вимірювального каналу його результат можна приблизно відновити за даними сусідніх працездатних каналів. Точність такого відновлення залежить від характеру зміни фізичної величини та відстані до найближчих доступних

точок вимірювання. Якщо одночасно відмовляють сусідні канали, похибка збільшується. Тому наявність декількох просторово розподілених каналів дає можливість не тільки контролювати об’єкт у різних точках, але й частково компенсувати втрату вимірювальної інформації при локальних відмовах.

Література:

1. Wang Y., Chen Y., Yao Y., Ou J. Advancements in Optimal Sensor Placement for Enhanced Structural Health Monitoring: Current Insights and Future Prospects. *Buildings*. 2023. Vol. 13, No. 12. Art. 3129. DOI: 10.3390/buildings13123129.

2. Missing data recovery in wireless sensor networks: a review of recent methods and applications. *Sensors*. 2024. URL: https://www.mdpi.com/journal/sensors (дата звернення: 25.09.2026).

3. Ilaya O. et al. Distributed Estimation of Fields Using a Sensor Network with Quantized Measurements. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 16. Art. 5299. DOI: 10.3390/s24165299.

4. Sunderhaft R., Frank L., Davis J. Deep Learning Improvements for Sparse Spatial Field Reconstruction. 2024. arXiv:2408.12531. URL: https://arxiv.org/abs/2408.12531 (дата звернення: 25.09.2026).

5. Deep learning-based missing sensor data reconstruction for structural health monitoring. *Measurement*. 2024. URL: https://www.sciencedirect.com/journal/measurement (дата звернення: 25.09.2026).

6. Sun Z., Mahmoodian M., Sidiq A., Jayasinghe S., Shahrivar F., Setunge S. Optimal Sensor Placement for Structural Health Monitoring: A Comprehensive Review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2025. Vol. 14, No. 2. Art. 22. DOI: 10.3390/jsan14020022.

***Іщенко Н. А.**, ст. гр. ММ-61-25*

Науковий керівник: доц. ***Грайворонська І. В.***

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ В УМОВАХ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Температурні вимірювальні канали можуть поступово втрачати відповідність установленим метрологічним вимогам унаслідок старіння чутливих елементів, зміни коефіцієнтів перетворення та впливу умов експлуатації. Калібрування визначає характеристики засобу вимірювання на момент його проведення, однак саме по собі не забезпечує незмінність цих характеристик протягом наступного міжкалібрувального інтервалу.

Мета роботи – оцінити ймовірність збереження метрологічної справності температурного вимірювального каналу залежно від тривалості експлуатації та визначити розрахункову максимальну тривалість між калібруваннями за заданим критерієм надійності.

Для дослідження прийнято модель лінійного дрейфу систематичної похибки:

$$\Delta(t) = \Delta\tau + A \cdot t, \qquad (1)$$

де $\Delta\tau$ – початкова систематична похибка, °C;

A – випадкова швидкість дрейфу, °C/рік;

t – тривалість експлуатації, років.

У моделі $\Delta\tau$ та A є статистично незалежними випадковими величинами.

Метрологічна справність визначається виконанням умови $|\Delta(\tau)| \leq \Delta$доп для всіх моментів $\tau \in [0; t]$. Відповідно показник метрологічної надійності задано як імовірність неперервного збереження встановлених меж похибки:

$$P_м(t) = P\{\, |\Delta(\tau)| \le \Delta_{доп} \text{ для всіх } \tau \in [0;\, t] \,\}. \quad (2)$$

Оскільки траєкторія $\Delta(t)$ є лінійною, для перевірки умови (2) достатньо перевірити її на початку та наприкінці інтервалу. Оцінювання здійснено методом Монте-Карло на $M = 20\,000$ незалежних реалізацій:

$$\hat{P}_м(t) = (1/M) \cdot \Sigma\, q_j(t), \quad j = 1, \ldots, M, \qquad (3)$$

де $q_j(t)$ дорівнює одиниці, якщо в j-й реалізації умова метрологічної справності виконується на всьому інтервалі $[0; t]$, і нулю в іншому випадку.

Для ілюстративного чисельного експерименту використано $\Delta_0 \sim N(0;\, 0{,}15^2)$ °C, $A \sim N(0{,}10;\, 0{,}035^2)$ °C/рік та $\Delta_{доп} = 0{,}50$ °C. Ці розподіли обрано як модельні припущення: вони не отримані за результатами випробування конкретного датчика. Рівень необхідної надійності прийнято $P_{зад} = 0{,}95$. Обчислення виконано на сітці часу з кроком 0,01 року.

Таблиця 1 – Оцінювання метрологічної надійності за результатами Монте-Карло

Час, роки	$\hat{P}_м(t)$	Час, роки	$\hat{P}_м(t)$
0	0,99905	4	0,68920
1	0,99440	5	0,49675
2	0,96435	6	0,34540
3	0,85875	7	0,24385

Отримана залежність свідчить про монотонне зменшення ймовірності безвідмовного в метрологічному сенсі функціонування вимірювального каналу зі збільшенням тривалості експлуатації. Зокрема, після двох років імовірність становить 0,96435, а після трьох – 0,85875.

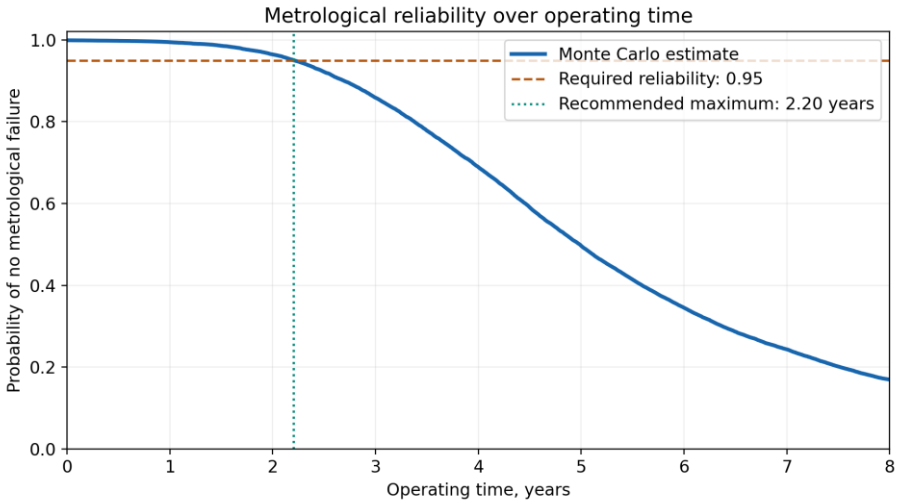


Рисунок 1 – Імовірність збереження метрологічної справності залежно від часу експлуатації

Розрахункову максимальну тривалість між калібруваннями визначено як найбільше t, для якого $\hat{P}м(t) \geq 0{,}95$. На прийнятій часовій сітці отримано $t = 2{,}20$ року ($\hat{P}м = 0{,}95025$), а на наступному кроці $t = 2{,}21$ року ймовірність зменшується до 0,94980. Таким чином, 2,20 року – максимальне значення для обраного порогового критерію та модельних припущень. У практичних умовах інтервал має додатково враховувати невизначеність оцінки та нормативні обмеження.

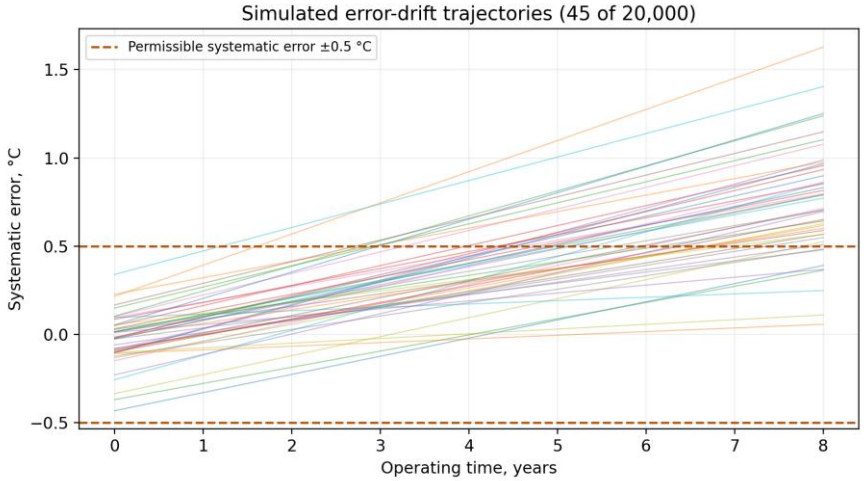


Рисунок 2 – Приклади змодельованих траєкторій дрейфу систематичної похибки

Висновки. У межах лінійної стохастичної моделі дрейфу реалізовано чисельне оцінювання ймовірності збереження метрологічної справності вимірювального каналу температури. За 20 000 реалізацій Монте-Карло встановлено, що прийнятий поріг надійності 0,95 дотримується до 2,20 року експлуатації включно (крок 0,01 року). Розроблена модель може бути використана для дослідження залежності міжкалібрувального інтервалу від допустимої похибки й статистичних характеристик дрейфу. Для практичного застосування необхідно оцінити ці характеристики за результатами калібрувань, врахувати випадкову складову похибки та перевірити адекватність моделі на реальних даних.

Література:

1. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.

2. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data – Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.

3. ILAC-G24:2022 / OIML D 10:2022. Guidelines for the determination of recalibration intervals of measuring equipment. 2022.

***Куроп'ятник М. С.**, студент магістратури*

Науковий керівник: д.т.н., проф. ***Полярус О. В.***

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ВИМОГИ ДО ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ВХІДНИХ І ВИХІДНИХ СИГНАЛІВ ПРИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СИСТЕМ

Ідентифікація динамічних систем передбачає побудову моделі системи на основі експериментальних даних. Для цього використовують вхідні та

вихідні сигнали, параметри яких попередньо вимірюються. Для проведення ідентифікації систем широко використовуються інформаційно-вимірювальні технології. Для їх організації потрібно мати інформацію про точність вимірювання параметрів вхідних і вихідних сигналів. На цей час не існує державних стандартів, що висувають вимоги до точності вимірювання зазначених сигналів. Від цієї точності залежить достовірність моделі системи, яка створюється при її ідентифікації.

Визначення вимог щодо точності вимірювання параметрів вхідних і вихідних сигналів є істотно важливими для забезпечення якісної ідентифікації динамічних систем.

Проведено аналіз впливу похибок вимірювання вхідних і вихідних сигналів системи на якість її ідентифікації, в якості якої використовувалася середньоквадратична похибка відновлення імпульсної характеристики системи та її постійної часу. В якості опорних вхідних сигналів використовувалися:

а) гармонічний сигнал;

б) сукупність гармонічних сигналів;

в) імпульсний сигнал;

г) псевдовипадкова двійкова послідовність;

д) модель ARMA: авторегресії – ковзного середнього.

Дослідження було стосовно лінійних системи. Щоб впевнитися, в якій мірі система наближається до лінійної запропонована проста практична методика оцінювання лінійності системи.

При наявності похибок вимірювання вхідного сигналу вихідний сигнал систем першого і другого порядків буде відрізнятися від опорного вихідного сигналу і опосередковано характеризує вплив вхідних похибок.

Також слід враховувати вплив інтервалу дискретизації на точність розв’язання диференціального рівняння системи.

Аналіз відносних похибок визначення магнітуди і фази передатної функції динамічних систем відповідно першого і другого порядків при наявності шумів на її вході і виході при різних відношеннях сигнал/шум дозволяють зробити висновки:

1) зі збільшенням відношення сигнал/шум (що аналогічно зменшенню похибок вимірювання) відносні похибки визначення амплітудно-частотної (АЧХ) і фазо-частотної (ФЧХ) характеристик зменшуються для динамічної системи першого порядку; для системи другого порядку вони неоднозначно залежать від рівня похибок на вході і виході системи;

2) при малих похибках вимірювання на вході і виході систем першого і другого порядків відносні похибки визначення магнітуди АЧХ і фази ФЧХ приблизно еквівалентні, тобто вплив точності вимірювання на вході і виході систем однаково впливає на якість ідентифікації систем;

3) при великих похибках вимірювання точність вимірювання на вході більше впливає на якість ідентифікації, ніж аналогічні похибки на виході; це характерно для систем як першого, так і другого порядків;

Було проведено аналіз впливу похибок вимірювання вхідних і вихідних сигналів на точність визначення постійної часу системи. Якість ідентифікації оцінювалася шляхом мінімізації функціоналу

$$\Delta(\tau) = \int_0^T \left(y(t,\tau) - y_{on}(t) \right)^2 dt$$

З результатів моделювання випливає, що похибки вимірювання вхідного сигналу, які описуються аналогічно шуму, незначно залежать від ВСШ. Це свідчить про те, що динамічна система згладжує пульсації на вході. Похибки вимірювання вихідного сигналу залежать від ВСШ, однак якщо відношення сигнал/шум перевищує 10 дБ, похибки визначення постійної часу є малими і слабко залежать від ВСШ.

***Моторна О. А.**, здобувачка гр. ММ-61-25*
*Науковий керівник: **Медведовська Я. С.**, канд. техн. наук, доцент*
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА КОМПЕНСАЦІЯ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ КОНТРОЛЮ ПАРАМЕТРІВ БЕЗПЕКИ

Контроль температури технічних об’єктів є важливим чинником безпеки експлуатації. Систематична похибка вимірювального каналу може спричиняти хибне спрацювання сигналізації або пропуск небезпечного стану. Стандартна калібрувальна поправка за незмінної моделі не завжди відображає зміни впливних величин; натомість система на основі бази знань може використовувати кілька верифікованих моделей відповідно до наявного режиму експлуатації [1-3].

Мета роботи – обґрунтувати структуру бази знань, правила вибору поправок і провести демонстраційне порівняння інтелектуальної компенсації з традиційним калібрувальним коригуванням за однаковою тестовою вибіркою.

Запропонована база знань складається з: (1) фактів – діапазонів температур, режимів і даних калібрування; (2) бібліотеки локальних моделей поправки; (3) продукційних правил «ЯКЩО–ТО»; (4) перевірки області застосовності моделі та коректності прийнятого порогового рішення. База знань не замінює калібрування: коефіцієнти локальних моделей мають визначатися за його результатами.

Модель вимірювання: $y=T+\Delta(T,s)+\varepsilon$; скоригований результат: $\hat{T}=y-f_s(y-80)$. Тут T – еталонне значення, y – показ вимірювального каналу, s – відомий дискретний режим, ε – випадковий шум, f_s – локальна

апроксимація систематичної поправки. Поправку визначають від фактично доступного показу y, а не від невідомої еталонної температури T.

Правила: $R1$: ЯКЩО режим номінальний, ТО використати модель f_1. $R2$: ЯКЩО режим підвищеного теплового впливу, ТО використати модель f_2. R3: ЯКЩО режим зниженого теплового впливу, ТО використати модель f_3. R4: ЯКЩО режим невідомий або вимірювання поза перевіреним діапазоном 60-100 °C, ТО не виконувати непідтверджене коригування та сформувати попередження. R5: ЯКЩО $\hat{T}$ наближається до межі безпеки 80 °C, ТО врахувати невизначеність вимірювання під час прийняття остаточного рішення [3].

Для наочного оцінювання ефективності запропонованого підходу проведено порівняльний аналіз результатів вимірювання температури за відсутності компенсації, із застосуванням традиційного калібрувального коригування та інтелектуального методу на основі бази знань. Результати моделювання наведено на рис. 1.

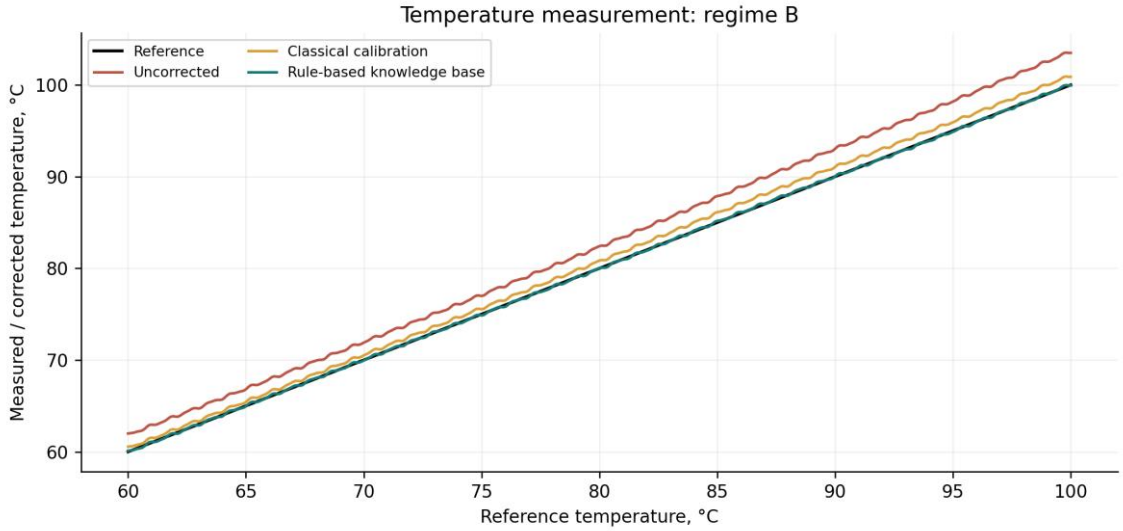


Рисунок 1 – Результати вимірювання температури за різних способів компенсації систематичної похибки

Для детальнішого аналізу точності вимірювань визначено залежності похибок від температури за різних способів коригування (рис. 2). Отримані модельні результати демонструють зменшення систематичних відхилень після застосування інтелектуальної компенсації.

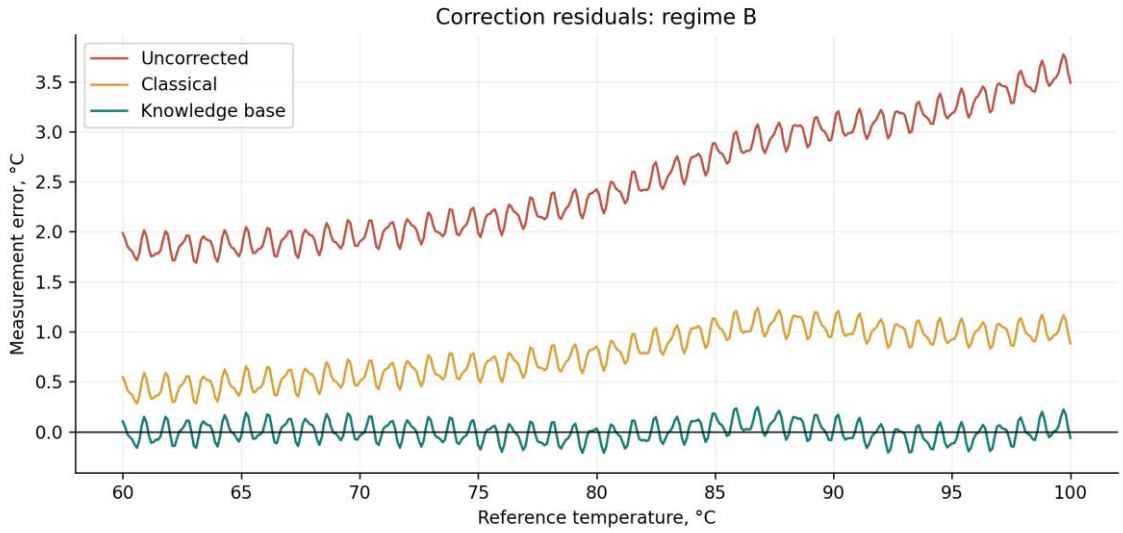


Рисунок 2 – Залежності похибок вимірювання температури від її значення за різних способів коригування

Для прозорої перевірки створено синтетичну модель трьох режимів (номінальний, підвищений та знижений тепловий вплив). Для калібрування використано 101 точку в кожному режимі (крок 0,4 °C), для незалежної перевірки – 401 точку (крок 0,1 °C) у кожному режимі, разом 1203 тестові спостереження. До сигналу додано детерміновані гармонічні збурення, що моделюють випадкоподібний шум; вони не є нормально розподіленими випадковими даними.

Порівнювалися три підходи: (А) без коригування; (Б) класична квадратична поправка, калібрована тільки для номінального режиму; (В) база знань із вибором окремої кубічної калібрувальної моделі для кожного із трьох режимів. Усі моделі оцінюють поправку за виміряним значенням, а всі метрики розраховано на одній і тій самій незалежній тестовій вибірці.

Порівняння (табл. 1) демонструє цінність додаткової інформації про режим, а не перевагу певного універсального алгоритму за повністю рівних даних.

За синтетичних умов RMSE зменшилась з 1,898 °C без коригування до 0,595 °C для традиційної моделі та 0,094 °C для бази знань. Відносне зменшення RMSE проти класичного варіанта становило 84,2 %. Порогові рішення оцінювали за правилом «небезпечний стан, якщо T ≥ 80 °C»; їх помилки включають хибні спрацювання та пропуски.

Таблиця 1 – Результати моделювання

Метод	RMSE, °C	Зміщення, °C	Макс. |e|, °C	Помилкові рішення
Без коригування	1,898	+1,759	3,772	45
Класичний	0,595	+0,059	1,238	10
База знань	0,094	-0,000	0,247	1

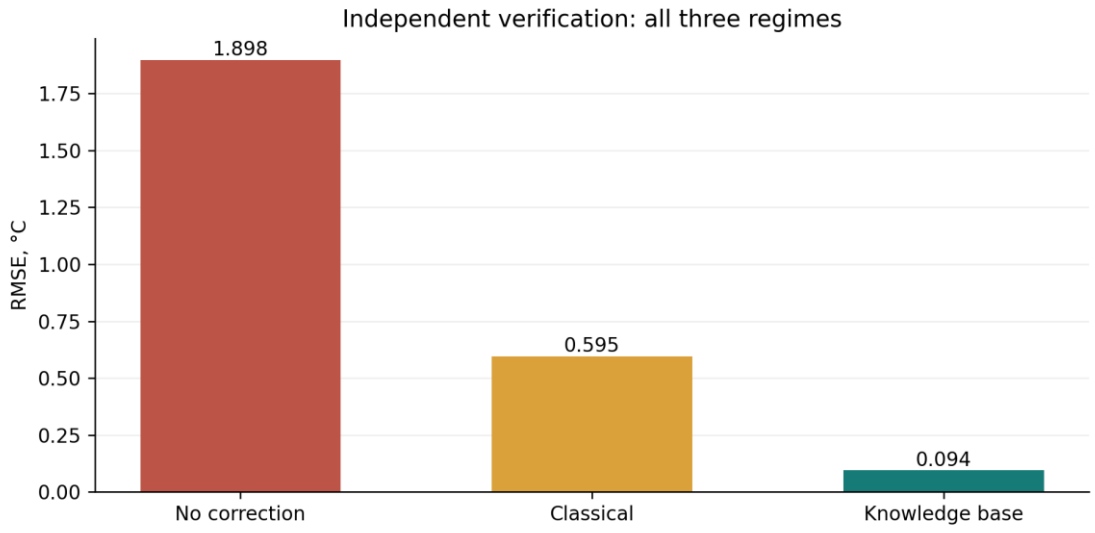


Рисунок 3 – Порівняння середньоквадратичних похибок трьох способів коригування

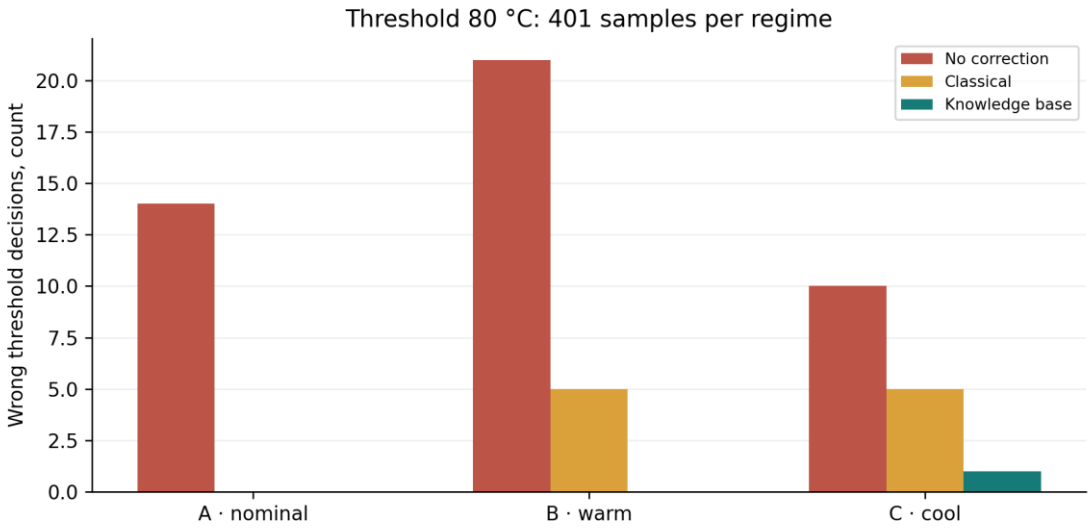


Рисунок 4 – Кількість помилкових рішень за порогом 80 °C у трьох режимах

Порівняння проведено для одного набору модельних функцій та детермінованих збурень; узагальнювати отримані відсотки на реальні датчики без фізичного калібрування та оцінювання невизначеності не можна. Окремо слід перевірити стійкість правил до помилок визначення режиму, невизначеність коефіцієнтів калібрування, гістерезис та вплив самонагріву датчика.

Запропоновано структуру бази знань, що поєднує результати калібрування, локальні моделі поправки, продукційні правила та перевірку допустимості їх застосування. На незалежній синтетичній вибірці показано потенційні переваги режимно-орієнтованого коригування над єдиною калібрувальною функцією, визначеною для номінального режиму. Подальший етап – експериментальна перевірка на вимірювальному каналі та оцінювання ризиків порогових рішень з урахуванням невизначеності [1-4].

Література:

1. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. DOI: 10.59161/JCGM100-2008E.

2. JCGM 101:2008. Evaluation of measurement data – Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method. DOI: 10.59161/JCGM101-2008.

3. JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. DOI: 10.59161/JCGM106-2012.

4. JCGM 200:2012. International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms. DOI: 10.59161/JCGM200-2012.

***Рояка Олексій**, студент ММ-61-25*

Науковий керівник:доц. ***Коваль О. А.***

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ МЕТОД АДАПТИВНОГО ЗЛИТТЯ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ІНФОРМАЦІЇ В БАГАТОКАНАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Багатоканальні інформаційно-вимірювальні системи забезпечують інформаційну надлишковість, яка може бути використана для підвищення точності та стійкості результату вимірювання. Однак просте усереднення показів є ефективним лише тоді, коли канали мають близькі метрологічні характеристики та зберігають їх у часі. У реальних умовах окремі канали можуть характеризуватися різною дисперсією шуму, зміщенням, поступовим дрейфом або появою викидів. За таких умов незмінні вагові коефіцієнти призводять до перенесення деградованої інформації у результат злиття. Сучасні дослідження розглядають багатосенсорне злиття на рівні даних, ознак і рішень, а адаптивне визначення внеску каналів залишається актуальним напрямом [1-4].

Мета роботи – розробити та дослідити інтелектуальний метод адаптивного злиття результатів багатоканальних вимірювань, у якому ваги каналів автоматично змінюються відповідно до поточної статистичної якості вимірювальної інформації.

Розглядається система з m каналів, що одночасно вимірюють одну фізичну величину. Кожний канал формує результат $x_i(k)$ у k-му циклі. На відміну від класичного зваженого усереднення, вагу пропонується визначати за поточною оцінкою дисперсії та робастною функцією достовірності:

$$w_i(k) = \frac{\frac{\rho_i(k)}{\hat{\sigma}_i^2(k)+\sigma_{\min}^2}}{\sum_{j=1}^{m}\frac{\rho_j(k)}{\hat{\sigma}_j^2(k)+\sigma_{\min}^2}}, \qquad \rho_i(k) = \min\left[1, \frac{c}{|r_i(k)|/[\hat{\sigma}_i(k)+\varepsilon]}\right], \tag{1}$$

де $w_i(k)$ – адаптивна вага i-го каналу;

$\hat{\sigma}_i^2(k)$ – поточна оцінка дисперсії його залишків;

$\sigma_{\min}$ – мінімальна шкала невизначеності, яка запобігає надмірному збільшенню ваги каналу з малою оціненою дисперсією;

$r_i(k) = x_i(k) - \mathrm{med}(\boldsymbol{x}(k))$ – залишок відносно медіани одночасних показів;

c – робастний поріг;

$\rho_i(k)$ – коефіцієнт довіри до поточного результату;

ε – мале додатне число для чисельної стійкості.

Нормування забезпечує умову $\sum_i w_i(k) = 1$. Таким чином, канал із малою дисперсією отримує більший внесок, але поява значного залишку додатково зменшує його вагу.

Поточна оцінка вимірюваної величини та дисперсія залишків формуються за виразами

$$\hat{x}(k) = \sum_{i=1}^{m} w_i(k) x_i(k), \quad (2)$$

$$\hat{\sigma}_i^2(k) = (1-\alpha)\hat{\sigma}_i^2(k-1) + \alpha \min[r_i^2(k), c^2 \hat{\sigma}_i^2(k-1)], \quad (3)$$

де $\hat{x}(k)$ – результат адаптивного злиття;

α – коефіцієнт адаптації, що визначає швидкість реакції на зміну статистичних властивостей; обмеження квадрата залишку зменшує вплив одиничного викиду на довготривалу оцінку дисперсії [5-7].

Формула (2) визначає кому довіряти, а (3) – як швидко змінювати цю довіру. Для дослідження сформовано шість вимірювальних каналів із різними початковими стандартними відхиленнями від 0,45 до 0,90 умовної одиниці. Істинне модельне значення прийнято рівним 100. Проведено 500 циклів вимірювання. До 180-го циклу всі канали працюють у штатному режимі; далі у другому каналі поступово формується дрейф до 3 одиниць. Із 290-го циклу у п’ятому каналі збільшується випадкова складова, а на завершальній ділянці додатково моделюються випадкові викиди. Інші канали залишаються працездатними. Така постановка дозволяє перевірити здатність алгоритму реагувати не лише на відомі наперед дисперсії, а на зміну якості інформації безпосередньо під час вимірювального процесу.

На рис. 1 видно, що до появи деградації ваги визначаються переважно початковою статистичною якістю каналів. Після початку дрейфу вага другого каналу поступово зменшується. Наприкінці експерименту вона становить приблизно 0,008, тобто його вплив на результат практично усувається. Для п’ятого каналу після збільшення шуму та появи викидів кінцева вага зменшується приблизно до 0,015. Водночас найбільші ваги переходять до першого та третього каналів – близько 0,372 і 0,407 відповідно. Отже, метод не виключає канал за наперед заданою ознакою несправності, а перерозподіляє інформаційний внесок відповідно до поточного стану даних.

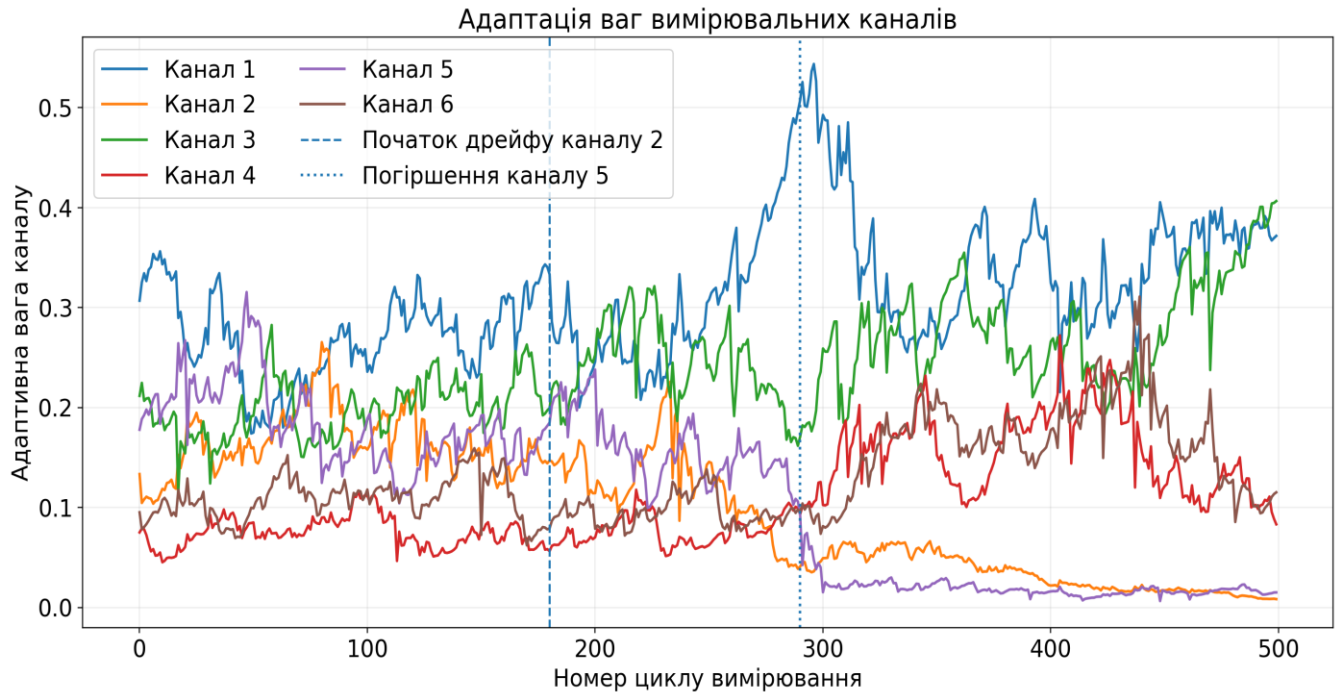


Рисунок 1 – Зміна адаптивних ваг каналів у процесі моделювання

Саме ця властивість відрізняє запропонований підхід від фіксованого зважування. Адаптивні методи багатосенсорного злиття використовують змінні ваги для зменшення похибки оцінювання; у роботі Qiu і Liu показано переваги адаптивного зважування за точністю, стабільністю та стійкістю до шуму [3]. У запропонованому модельному методі додатково використовується робастний коефіцієнт, тому короткочасний великий залишок не повинен автоматично визначати довготривалу якість каналу.

На рис. 2 наведено похибку результату відносно модельного істинного значення. За однакових ваг середньоквадратична похибка становить 0,477, тоді як для адаптивного методу – 0,284. Для заданого експерименту це відповідає зменшенню середньоквадратичної похибки приблизно на 40,4 %. Найбільша різниця виникає після деградації другого і п’ятого каналів: звичайне усереднення продовжує враховувати їх із тим самим внеском, тоді як адаптивний алгоритм зменшує їх ваги.

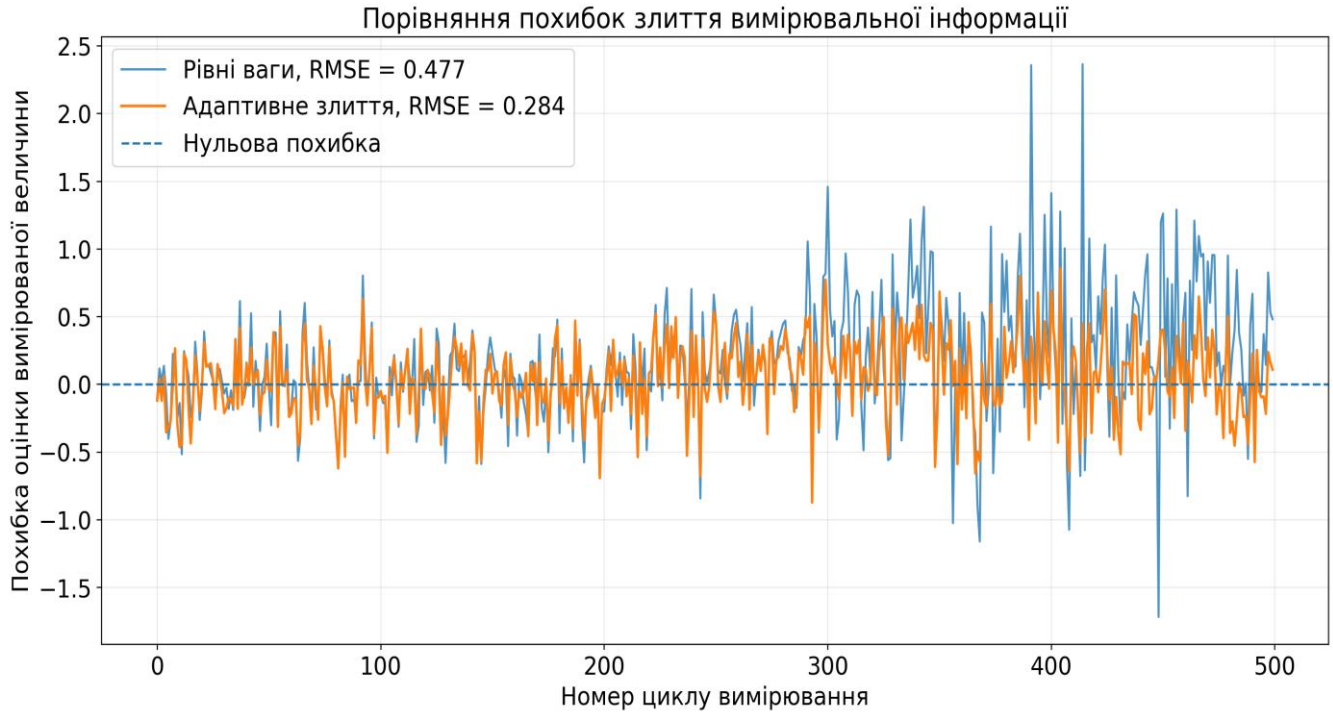


Рисунок 2 – Порівняння похибки рівновагового та адаптивного злиття

Отриманий виграш не слід трактувати як універсальне значення ефективності. Він залежить від кількості каналів, їх шуму, величини дрейфу, інтенсивності викидів та параметрів адаптації. Саме тому для доповіді розроблено інтерактивний чисельний експеримент. У Google Colab можна змінювати величину та момент початку дрейфу, додатковий шум і кількість викидів, коефіцієнт адаптації, робастний поріг, мінімальну шкалу невизначеності та реалізацію випадкового процесу.

Важливим дослідницьким параметром є α. За малого значення оцінка дисперсії є стабільною, але повільніше реагує на деградацію. Надмірне збільшення α прискорює реакцію, проте робить ваги чутливішими до випадкових флуктуацій. Аналогічний компроміс виникає при виборі c: малий поріг агресивніше пригнічує нетипові значення, але може зменшувати вагу коректного каналу під час реальної швидкої зміни вимірюваної величини.

Це виявляє важливе обмеження запропонованого методу. Якщо вимірювана величина швидко змінюється, але канали мають різні динамічні характеристики або часові затримки, відхилення від медіани може бути

спричинене не деградацією, а динамічною похибкою. Тому наступним етапом дослідження має бути попередня синхронізація каналів і компенсація їх динамічних характеристик. Інший перспективний напрям – введення кореляційної матриці похибок, оскільки проста залежність ваги від індивідуальної дисперсії не повністю використовує інформацію за корельованих шумів.

Науковий розвиток методу також доцільно пов’язати з переходом від одного рівня злиття до багаторівневої архітектури. Сучасні огляди виділяють злиття на рівні даних, ознак та рішень [1-7]. Для інформаційно-вимірювальної системи це означає можливість спочатку адаптивно об’єднувати метрологічно однорідні канали, далі формувати ознаки їх стану, а на верхньому рівні приймати рішення щодо придатності результату. Сучасні роботи також демонструють адаптивні модулі злиття, де внесок сенсорів змінюється залежно від структури даних [4].

Висновки. Запропоновано інтелектуальний метод адаптивного злиття вимірювальної інформації, у якому внесок кожного каналу визначається поточною статистичною якістю та робастною оцінкою достовірності його результату. Чисельний експеримент із шістьма каналами показав здатність методу автоматично зменшувати вагу каналів із дрейфом, підвищеним шумом і викидами та зберігати переважний внесок стабільних каналів. У заданому модельному експерименті адаптивне злиття зменшило середньоквадратичну похибку порівняно з рівноваговим усередненням приблизно на 40 %. Подальші дослідження доцільно спрямувати на врахування корельованих похибок, динамічних характеристик каналів, оцінювання невизначеності результату злиття та адаптацію методу до нестаціонарної вимірюваної величини.

Література:

1. Kibrete F., Woldemichael D. E., Gebremedhen H. S. Multi-Sensor data fusion in intelligent fault diagnosis of rotating machines: A comprehensive review.

Measurement. 2024. Art. 114658. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114658. URL: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114658 (дата звернення: 28.09.2026).

2. Lin T., Ren Z., Zhu L., Zhu Y., Feng K., Ding W., Yan K., Beer M. A Systematic Review of Multi-Sensor Information Fusion for Equipment Fault Diagnosis. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2025. Vol. 74. Art. 3507848. DOI: 10.1109/TIM.2025.3529577. URL: https://doi.org/10.1109/TIM.2025.3529577 (дата звернення: 28.09.2026).

3. Qiu M., Liu B. Multi-Sensor Adaptive Weighted Data Fusion Based on Biased Estimation. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 11. Art. 3275. DOI: 10.3390/s24113275. URL: https://doi.org/10.3390/s24113275 (дата звернення: 28.09.2026).

4. Lin T., Ren Z., Zhu L., Huang K., Zhu Y., Zeng L., Wan J. Neural architecture search for multi-sensor information fusion-based intelligent fault diagnosis. *Advanced Engineering Informatics*. 2024. Vol. 62, Part C. Art. 102776. DOI: 10.1016/j.aei.2024.102776. URL: https://doi.org/10.1016/j.aei.2024.102776 (дата звернення: 28.09.2026).

5. Zhang X., Wang H., Wang C., Liu M., Xu G. Time-segment-wise feature fusion transformer for multi-modal fault diagnosis. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 138, Part A. Art. 109358. DOI: 10.1016/j.engappai.2024.109358. URL: https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109358 (дата звернення: 28.09.2026).

6. Wang Z. Improved Kalman Filtering and Adaptive Weighted Fusion Algorithms for Enhanced Multi-Sensor Data Fusion in Precision Measurement. *Informatica*. 2025. URL: https://www.informatica.si/index.php/informatica/article/view/7122 (дата звернення: 28.09.2026).

7. ISO/IEC Guide 98-3:2008. *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*. Geneva : ISO,

2008. URL: https://www.iso.org/standard/50461.html (дата звернення: 28.09.2026).

***Сальнікова С. А.**, здобувачка гр. ММ-61-25*

*Науковий керівник: **Медведовська Я. С.**, к.т.н., доцент*

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ САМОНАЛАШТУВАННЯ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ НАПРУГИ ТА СИЛИ СТРУМУ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ДОСТОВІРНОСТІ КОНТРОЛЮ ЕЛЕКТРОБЕЗПЕКИ

Забезпечення електробезпеки технічних об'єктів, промислового обладнання та електроустановок значною мірою залежить від точності й достовірності вимірювання електричних величин, насамперед напруги та сили струму. Відхилення зазначених параметрів від установлених допустимих значень можуть свідчити про виникнення несправностей, порушення нормальних режимів експлуатації та формування потенційно небезпечних умов. Тому вдосконалення метрологічного забезпечення комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем є актуальним завданням підвищення ефективності контролю електричних параметрів.

Однією з основних причин зниження точності електричних вимірювань є зміна метрологічних характеристик вимірювальних каналів під впливом температурних коливань, старіння електронних компонентів, нестабільності коефіцієнтів передачі, зміщення нульового рівня та електромагнітних завад. Традиційні методи коригування, які ґрунтуються на використанні фіксованих калібрувальних коефіцієнтів, не завжди забезпечують достатню точність за змінних умов експлуатації.

Перспективним напрямом удосконалення таких систем є впровадження інтелектуальних алгоритмів самоналаштування, здатних автоматично

уточнювати параметри вимірювальних каналів. Зокрема, застосування нечіткої логіки дозволяє формувати коригувальні впливи на основі сукупності лінгвістичних правил без необхідності побудови складної аналітичної моделі регулятора.

Метою роботи є дослідження методу інтелектуального самоналаштування параметрів комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи вимірювання напруги та сили струму на основі нечіткої логіки для зменшення похибок вимірювання та підвищення достовірності контролю електричних параметрів.

Для досягнення поставленої мети розглянуто математичну модель двоканальної інформаційно-вимірювальної системи, що містить вимірювальні перетворювачі напруги та сили струму, блок аналого-цифрового перетворення, модуль цифрової обробки вимірювальної інформації, нечіткий регулятор та блок контролю допустимих значень електричних величин.

Математичну модель кожного вимірювального каналу представлено у вигляді:

$$y_X(k) = g_X(k)X(k) + b_X(k) + \varepsilon_X(k), \qquad (1)$$

де $X \in \{U, I\}$; $X(k)$ – значення вимірюваної величини;

$y_X(k)$ – вихідний сигнал вимірювального каналу;

$g_X(k)$ – коефіцієнт передачі;

$b_X(k)$ – зміщення нульового рівня;

$\varepsilon_X(k)$ – випадкова складова похибки;

k – номер відліку.

Для компенсації систематичних відхилень передбачено визначення скоригованого результату вимірювання:

$$\hat{X}(k) = \frac{y_X(k) - \hat{b}_X(k)}{\hat{g}_X(k)}, \qquad (2)$$

де $\hat{g}_X(k)$ та $\hat{b}_X(k)$ – поточні оцінки коефіцієнта передачі та зміщення нульового рівня відповідного вимірювального каналу.

Особливістю запропонованого підходу є використання періодичної діагностики для отримання інформації про зміну метрологічних характеристик системи. У математичній моделі передбачено застосування контрольних сигналів із відомими значеннями напруги 100 В та сили струму 5 А. Діагностичні вимірювання виконуються через кожні десять відліків, а зміщення нульового рівня визначається окремою процедурою контролю.

За результатами діагностичного вимірювання оцінка коефіцієнта передачі визначається як

$$g_{X,diag}(k) = \frac{y_{X,ref}(k) - \hat{b}_X(k)}{X_{ref}}, \qquad (3)$$

де $y_{X,ref}(k)$ – результат вимірювання контрольного сигналу;

X_{ref} – його відоме значення (100 В для каналу напруги та 5 А для каналу струму).

Отримана діагностична інформація використовується для формування вхідної змінної нечіткого регулятора, яка характеризує відхилення поточної оцінки коефіцієнта передачі від діагностично визначеного значення:

$$e_X(k) = sat_{[-2;2]}\left(\frac{g_{X,diag}(k) - \hat{g}_X(k)}{0,02}\right), \qquad (4)$$

де $sat_{[-2;2]}(\square)$ – функція обмеження значення інтервалом від −2 до 2;

$0,02$ – параметр нормалізації відхилення.

Інтелектуальне самоналаштування реалізовано із застосуванням нечіткого регулятора типу Суґено нульового порядку. Для опису вхідної змінної використано п'ять лінгвістичних термів: «значне від'ємне», «мале від'ємне», «близьке до нуля», «мале додатне» та «значне додатне». Відповідні функції належності задають ступінь приналежності поточного діагностичного відхилення до кожного з визначених станів.

База нечітких правил містить п'ять продукційних правил. За значного від'ємного відхилення передбачається суттєве зменшення оцінки коефіцієнта передачі, за малого від'ємного – її незначне зменшення. Якщо відхилення близьке до нуля, поточне значення коефіцієнта зберігається. У разі малого або значного додатного відхилення формується відповідний коригувальний вплив, спрямований на збільшення оцінки коефіцієнта передачі.

Результат нечіткого висновування визначається нормованим зваженим усередненням вихідних значень активованих правил:

$$F\left(e_X\right)=\frac{\sum_{j=1}^{5}\mu_j\left(e_X\right)c_j}{\sum_{j=1}^{5}\mu_j\left(e_X\right)}, \qquad (5)$$

де $\mu_j\left(e_X\right)$ – ступінь належності нормалізованого відхилення до *j*-го нечіткого терма;

c_j – стала величина вихідного впливу відповідного правила;

j – номер нечіткого правила.

За результатами нечіткого висновування здійснюється оновлення поточної оцінки коефіцієнта передачі:

$$\hat{g}_X\left(k+1\right)=\hat{g}_X\left(k\right)+\alpha K_e F\left(e_X\left(k\right)\right), \qquad (6)$$

де $\alpha = 0,65$ – коефіцієнт інтенсивності адаптації;

$K_e = 0,02$ – масштабувальний коефіцієнт;

$F\left(e_X\left(k\right)\right)$ – результат нечіткого висновування.

За результатами демонстраційного моделювання отримано такі значення середньоквадратичних похибок (табл. 1).

Таким чином, розглянуто метод інтелектуального самоналаштування параметрів комп'ютеризованої інформаційно-вимірювальної системи вимірювання напруги та сили струму на основі нечіткої логіки. Використання нечіткого регулятора типу Суґено нульового порядку забезпечує адаптивне уточнення коефіцієнтів передачі вимірювальних каналів за результатами періодичної діагностики. За результатами демонстраційного математичного моделювання встановлено зменшення середньоквадратичної похибки вимірювання напруги на 94,9 %, а сили струму – на 89,6 % порівняно з використанням фіксованих коефіцієнтів коригування. Отримані результати підтверджують перспективність запропонованого підходу для підвищення точності електричних вимірювань. Подальші дослідження доцільно спрямувати на експериментальну перевірку алгоритму та оцінювання достовірності контролю граничних значень електричних величин.

Таблиця 1 – Порівняння точності вимірювання напруги та сили струму

Спосіб обробки	RMSE напруги, В	RMSE струму, А
Без коригування	5,893	0,294
Фіксоване коригування	3,188	0,241
Нечітке самоналаштування	0,162	0,025

Література:

1. Zadeh L. A. Fuzzy Sets. Information and Control. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338-353. DOI: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.

2. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. International Journal of Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7, No. 1. P. 1-13. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2.

3. Takagi T., Sugeno M. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. 1985. Vol. SMC-15, No. 1. P. 116-132. DOI: 10.1109/TSMC.1985.6313399.

4. JCGM 100:2008. Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement. Joint Committee for Guides in Metrology, 2008.

5. JCGM 106:2012. Evaluation of measurement data – The role of measurement uncertainty in conformity assessment. Joint Committee for Guides in Metrology, 2012.

Студент ММ-41-23 ***Сафарян Вадим***

Науковий керівник: к.т.н., доц. ***Коваль А. О.***

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОСТОРОВОЇ КОРЕЛЯЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ В БАГАТОКАНАЛЬНІЙ РОЗПОДІЛЕНІЙ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ

Уявімо протяжний технологічний об’єкт, на якому тиск вимірюють одразу в кількох точках. Сусідні датчики «бачать» один і той самий фізичний процес, тому їхні показання зазвичай змінюються схоже. Але що далі точки одна від одної, то слабшим стає цей зв’язок. Якщо зрозуміти, як саме він слабшає з відстанню, можна відповісти на два практичні питання: чи вдало розміщено канали і чи немає в системі зайвих датчиків, які стоять надто близько й фактично дублюють один одного.

Просторовий аналіз вимірювальних даних широко використовують у розподілених системах моніторингу трубопроводів, гідравлічних мереж та інших протяжних об’єктів [1-3]. У таких системах важить не лише точність окремого датчика, а й те, як узгоджуються між собою результати, отримані в різних точках. Один із найпростіших способів оцінити цей зв’язок кількісно – кореляційний аналіз [4].

Мета роботи – з’ясувати, як кореляція результатів вимірювання тиску залежить від відстані між каналами багатоканальної розподіленої інформаційно-вимірювальної системи.

Для цього ми побудували модель, у якій дев’ять каналів розміщено вздовж протяжного об’єкта на ділянці від 0 м до 60 м. Середній тиск становить 1,20 МПа. У кожній точці тиск повільно змінюється, причому частина цих змін спільна для сусідніх точок, а зверху накладається невеликий вимірювальний шум. Модель побудована так, що близькі канали змінюються майже синхронно, а з відстанню ця схожість поступово зникає.

Наскільки схожі результати двох каналів, ми оцінюємо за коефіцієнтом кореляції:

$$r_{ij} = \frac{\mathrm{cov}(p_i, p_j)}{\sigma_i \sigma_j}, \qquad (1)$$

де p_i і p_j – результати вимірювання тиску у двох каналах;

$\mathrm{cov}(p_i, p_j)$ – їхня коваріація, тобто міра того, наскільки узгоджено вони змінюються;

σ_i та σ_j – стандартні відхилення результатів.

Якщо r_{ij} близький до одиниці, тиск у двох точках змінюється майже однаково.

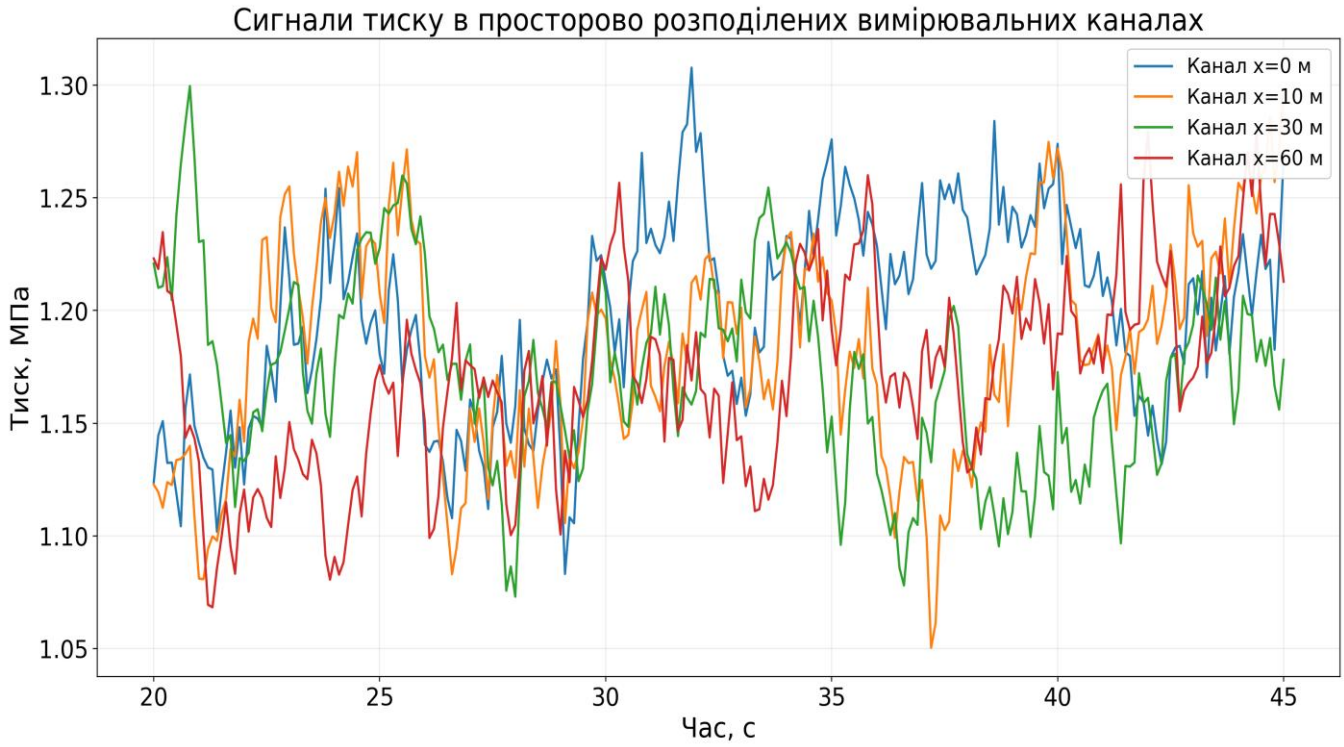


Рисунок 1 – Результати вимірювання тиску у просторово розподілених каналах

На рис. 1 показано фрагменти сигналів чотирьох каналів, розташованих на різній відстані вздовж об’єкта. Усі сигнали коливаються навколо одного середнього рівня, але форма локальних коливань у них різна. Сигнали близьких каналів мають багато спільного – їхні піки та спади майже збігаються. У віддалених точках відмінності вже добре помітні. Саме так і виглядають реальні дані, коли на тиск водночас впливають загальні процеси в системі та локальні збурення.

Далі для кожної пари каналів ми визначили відстань між точками вимірювання та відповідний коефіцієнт кореляції. Результати для однакових відстаней усереднили. Так ми перейшли від окремих пар каналів до загальної картини – залежності просторової кореляції від відстані.

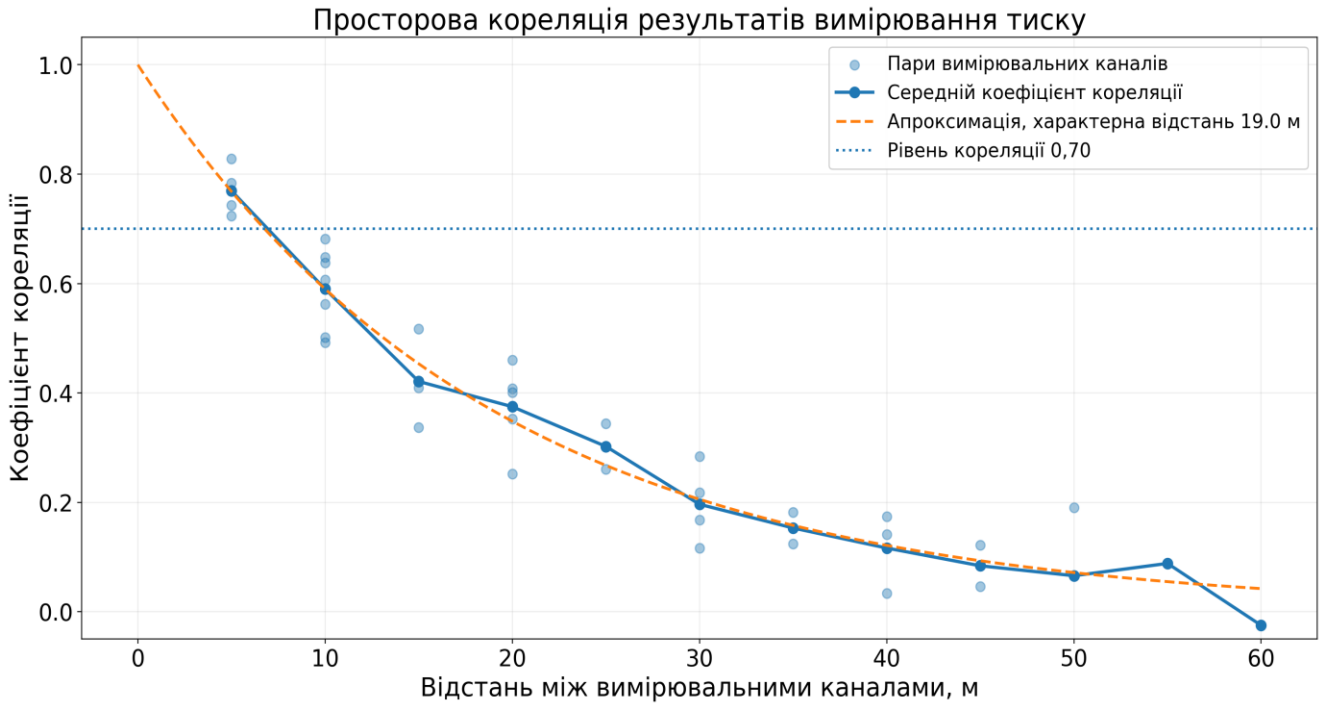


Рисунок 2 – Залежність кореляції результатів вимірювання тиску від відстані між каналами

Рис. 2 наочно показує: що більша відстань, то нижча в середньому кореляція. У базовій реалізації для відстані 5 м коефіцієнт кореляції становить приблизно 0,77, для 10 м – уже 0,59, для 20 м – 0,38, а для 40 м падає до 0,12. Характерна відстань просторової кореляції виходить близько 19 м. Простіше кажучи, помітний статистичний зв’язок зберігається лише між відносно близькими точками, а на відстані кількох десятків метрів канали вже майже незалежні.

Горизонтальна лінія на рисунку – контрольний рівень кореляції 0,70. У базовому експерименті його «тримають» лише канали, рознесені приблизно на 5 м. Одразу застережемо: це не універсальна метрологічна норма. У роботі ми використовуємо його як демонстраційний критерій, щоб зручно порівнювати різні конфігурації системи. На реальному об’єкті допустимий рівень треба обирати, виходячи із задачі контролю та властивостей технологічного процесу.

Навіщо все це потрібно на практиці? Кореляція допомагає оцінити, наскільки система надлишкова. Якщо сусідні канали тривалий час показують майже однакові результати, частина інформації просто дублюється. Якщо ж канали рознесені надто далеко, система може пропустити локальну зміну тиску між ними. Тому аналіз кореляції можна використовувати як один із критеріїв, коли вирішуємо, скільки точок вимірювання потрібно і де їх розмістити. Схожі задачі оптимального розміщення сенсорів і просторового моніторингу активно розглядають у сучасних дослідженнях розподілених систем [3, 5, 6].

Щоб усе це можна було побачити наживо, ми розробили інтерактивний блокнот у Google Colab. У ньому можна змінювати характерну відстань просторової кореляції, рівень вимірювального шуму, амплітуду змін тиску та контрольний рівень кореляції. Щойно параметри змінено, часові сигнали та графік залежності кореляції від відстані перебудовуються автоматично.

Висновки. Моделювання показало, що результати вимірювання тиску в рознесених у просторі каналах статистично пов’язані, і сила цього зв’язку залежить від відстані між точками вимірювання. Близькі канали корелюють сильно, а з відстанню кореляція загалом слабшає. Аналіз цієї залежності можна використати, щоб оцінити інформаційну надлишковість системи та обґрунтувати, як розміщувати канали в багатоканальній інформаційно-вимірювальній системі.

Література:

1. Pipeline monitoring systems using distributed sensing: a review of recent approaches. *Sensors*. 2024. URL: https://www.mdpi.com/journal/sensors (дата звернення: 24.09.2026).

2. Recent advances in distributed sensing for pipeline and infrastructure monitoring. *Measurement*. 2024. URL: https://www.sciencedirect.com/journal/measurement (дата звернення: 24.09.2026).

3. Sun Z., Mahmoodian M., Sidiq A., Jayasinghe S., Shahrivar F., Setunge S. Optimal Sensor Placement for Structural Health Monitoring: A Comprehensive Review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2025. Vol. 14, No. 2. Art. 22. DOI: 10.3390/jsan14020022. URL: https://doi.org/10.3390/jsan14020022 (дата звернення: 24.09.2026).

4. Montgomery D. C., Runger G. C. *Applied Statistics and Probability for Engineers*. 8th ed. Wiley, 2024.

5. Kim S.-H., Kyung J., An J.-H., Eun H.-C. Hybrid Sensor Placement Framework Using Criterion-Guided Candidate Selection and Optimization. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 14. Art. 4513. DOI: 10.3390/s25144513. URL: https://doi.org/10.3390/s25144513 (дата звернення: 24.09.2026).

6. Wang Y., Chen Y., Yao Y., Ou J. Advancements in Optimal Sensor Placement for Enhanced Structural Health Monitoring: Current Insights and Future Prospects. *Buildings*. 2023. Vol. 13, No. 12. Art. 3129. DOI: 10.3390/buildings13123129. URL: https://doi.org/10.3390/buildings13123129 (дата звернення: 24.09.2026).

***Шабленко Денис**, студент ММ-61-25*

Науковий керівник: доц. ***Коваль А. О.***

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ГЕТЕРОГЕННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ЗА ЧАСОВИМИ ПАТЕРНАМИ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК

У багатоканальних інформаційно-вимірювальних системах одночасно працюють датчики різної фізичної природи. Вони відрізняються принципом перетворення, діапазоном і динамічними властивостями, тобто такі канали є

гетерогенними. Через це їхню метрологічну деградацію не можна правильно описати одним абсолютним показником. Наприклад, для датчика тиску найважливішою може бути зміна нуля, для температурного каналу – дрейф характеристики перетворення, а для вібраційного – зростання шуму і зміна чутливості. Крім того, при тривалій експлуатації мало просто зафіксувати, що характеристика вийшла за допустиму межу. Потрібно заздалегідь помітити характерний часовий патерн деградації.

Проблема довготривалої стабільності вимірювань активно розглядається і в сучасних дослідженнях. У роботі Schaller та співавторів показано, що дрейф сенсорів поступово погіршує точність промислових вимірювань, тому потрібні методи, які можуть підлаштовуватися під різну тяжкість і динаміку дрейфу [1]. Для сенсорних мереж окремо досліджують оцінювання невизначеності та дрейфу, бо мережева структура дає нові можливості, але водночас ускладнює класичне оцінювання невизначеності [2]. Новий стандарт ISO 10012:2026 спрямовує систему менеджменту вимірювань на забезпечення довіри до достовірності та надійності результатів вимірювань і на керування ризиками вимірювальних процесів [3].

Мета роботи – розробити та дослідити інтелектуальну технологію оцінювання метрологічної надійності гетерогенних вимірювальних каналів за часовими патернами зміни їхніх метрологічних характеристик, яка дозволяє рано виявляти деградацію і прогнозувати втрату метрологічної придатності.

Основна ідея технології полягає в тому, щоб перейти від абсолютних одиниць різних фізичних величин до нормованого простору метрологічних характеристик. Для кожного каналу ми контролюємо три групи ознак: зміщення результату, випадкову складову та відносну зміну чутливості. Комплексний індекс зміни метрологічних характеристик визначаємо так:

$$Q_i(t) = \sqrt{w_b \left(\frac{b_i(t)}{b_{i,\text{доп}}}\right)^2 + w_\sigma \left(\frac{\sigma_i(t)}{\sigma_{i,\text{доп}}}\right)^2 + w_S \left(\frac{\Delta S_i(t)}{\Delta S_{i,\text{доп}}}\right)^2}, \qquad w_b + w_\sigma + w_S = 1, \quad (1)$$

де $Q_i(t)$ – комплексний індекс i-го каналу;

$b_i(t)$ – поточне зміщення;

$b_{i,\text{доп}}$ – допустиме зміщення;

$\sigma_i(t)$ – поточна характеристика випадкової складової;

$\sigma_{i,\text{доп}}$ – її допустимий рівень;

$\Delta S_i(t)$ – зміна чутливості;

$\Delta S_{i,\text{доп}}$ – допустима зміна чутливості;

w_b, w_σ, w_S – вагові коефіцієнти.

Завдяки нормуванню можна аналізувати разом канали тиску, температури, вібрації, переміщення та частоти обертання і не порівнювати між собою несумісні фізичні одиниці.

Однак саме лише поточне значення $Q_i(t)$ ще нічого не говорить про тенденцію. Тому на другому етапі ми аналізуємо локальний патерн на рухомому часовому вікні і прогнозуємо момент, коли канал досягне граничного стану:

$$\hat{t}_{i,\text{гр}} = t_k + \frac{Q_{\text{гр}} - Q_i(t_k)}{\hat{a}_i(t_k)}, \qquad \hat{a}_i(t_k) = \frac{\sum_{n=k-L}^{k} (t_n - \bar{t})\,[Q_i(t_n) - \bar{Q}_i]}{\sum_{n=k-L}^{k} (t_n - \bar{t})^2}, \tag{2}$$

де $\hat{t}_{i,\text{гр}}$ – прогнозований момент досягнення граничного індексу;

$Q_{\text{гр}}$ – прийнятий критерій метрологічної придатності;

$\hat{a}_i(t_k)$ – локальна оцінка швидкості деградації;

L – довжина вікна аналізу;

$\bar{t}$ та $\bar{Q}_i$ – середні значення часу та індексу у вікні.

Прогноз будується тільки тоді, коли тенденція додатна і стійка. Так можна відрізнити короткочасну флуктуацію від систематичної деградації.

Для модельного дослідження ми сформували п’ять гетерогенних каналів: тиск, температура, вібрація, лінійне переміщення та частота обертання. Для кожного з них задано свої швидкості дрейфу, зростання шуму та зміни чутливості. Загальне напрацювання становить 1040 год. Після 600 год у вібраційному каналі моделюється прискорена деградація, а в каналі частоти обертання після 760 год – додаткове зростання зміщення. Отже, ми розглядаємо не одну відмову, а кілька різних часових сценаріїв втрати метрологічних властивостей.

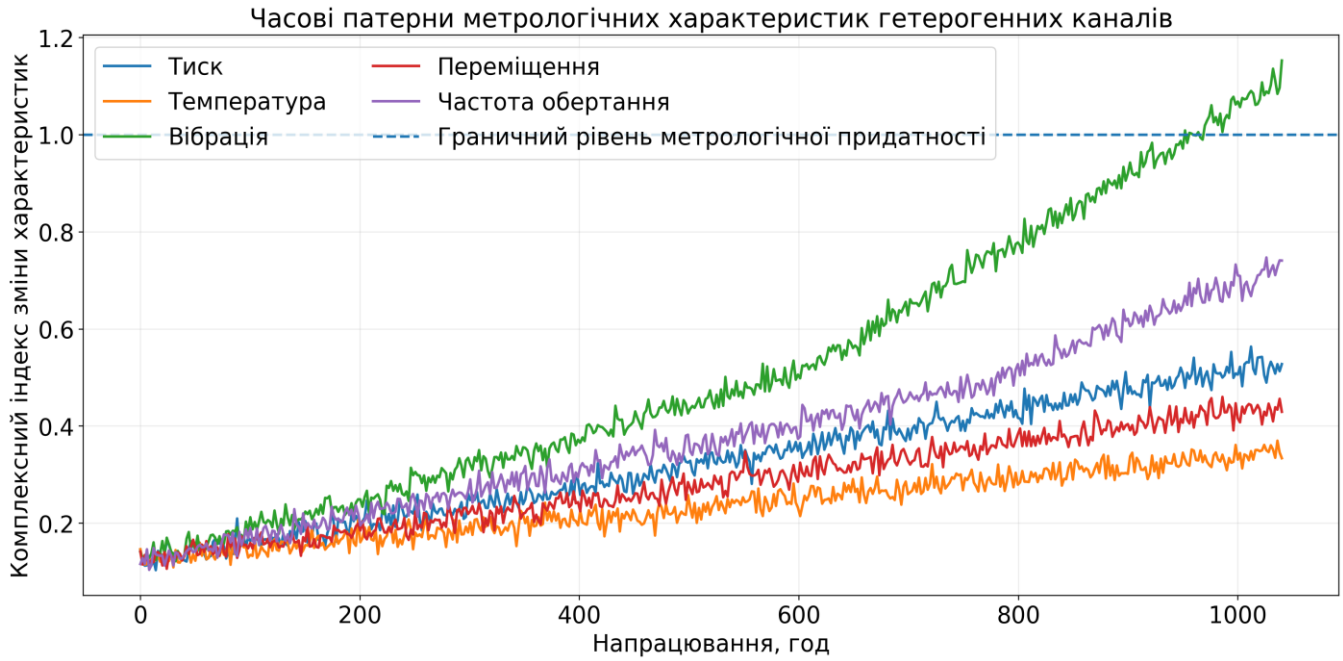


Рисунок 1 – Часові патерни зміни метрологічних характеристик гетерогенних вимірювальних каналів

На рис. 1 показано, як змінюється комплексний індекс $Q_i(t)$. Найповільніше деградує температурний канал, а вібраційний після 600 год починає деградувати значно швидше. У базовій реалізації саме він першим досягає умовної межі $Q_{\text{гр}} = 1$ – приблизно на 952-й годині. Інші чотири канали до кінця модельного інтервалу цієї межі не досягають. На нашу

думку, це важливіше, ніж просто розставити канали за поточним значенням індексу: за формою часової залежності можна помітити, що швидкість деградації змінилася, ще до того, як канал фактично вийде за межу.

Щоб перейти від індексу до зручної оцінки метрологічної надійності, у модельному експерименті ми використали монотонну логістичну функцію $R_i(t) = [1 + \exp\{\beta(Q_i(t) - 1)\}]^{-1}$. Ми не вважаємо її універсальним нормативним визначенням метрологічної надійності. Вона потрібна для дослідження, щоб перевести запас метрологічної придатності у шкалу від 0 до 1. Параметр β визначає, наскільки різким буде перехід поблизу граничного стану.

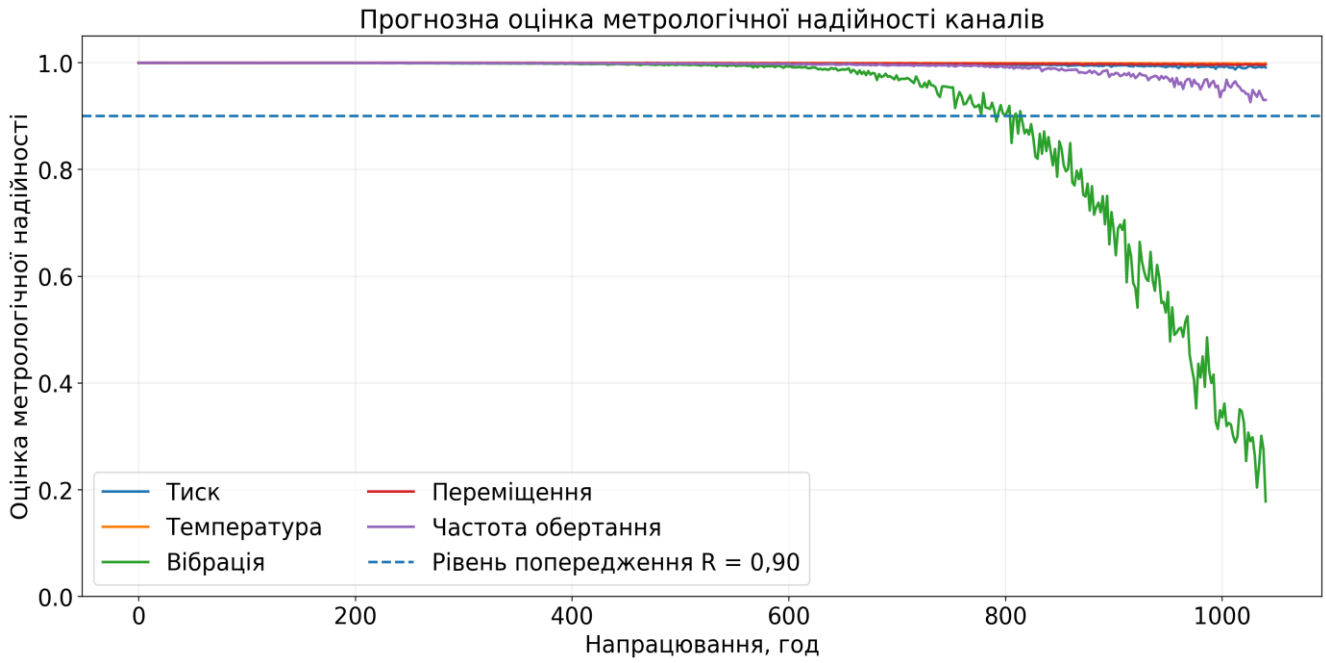


Рисунок 2 – Прогнозна оцінка метрологічної надійності гетерогенних каналів

З рис. 2 видно, що оцінка надійності знижується для різних каналів по-різному. Наприкінці базового експерименту вона становить приблизно 0,991 для каналу тиску, 0,999 для температурного каналу, 0,178 для вібраційного, 0,997 для каналу переміщення та 0,930 для каналу частоти обертання. Рівень $R = 0{,}90$ на рисунку ми використали як дослідницький рівень попередження, а не як нормативну вимогу. Він показує, що можна не чекати порушення і

перевіряти канал уже після нього, а заздалегідь планувати метрологічне підтвердження.

Інтелектуальною цю технологію робить саме прогнозна частина. Алгоритм аналізує не тільки поточні характеристики, а й швидкість, напрям і зміну структури їхньої зміни в часі. У сучасних роботах такий підхід розвивається під назвою predictive calibration (прогнозне калібрування). Наприклад, Shangguan та співавтори у 2026 році запропонували прогнозну стратегію калібрування акселерометрів. У їхній моделі надійності враховуються деградація похибки, невизначеність і ефект калібрування, а моменти калібрування визначаються адаптивно відповідно до заданих вимог [4]. Для силомоментних датчиків також запропоновано метод, який визначає динаміку дрейфу безпосередньо із зашумлених вимірювальних даних [5].

Окремо варто звернути увагу на гетерогенність каналів. Однакова швидкість зміни абсолютної похибки означає зовсім різне для датчика тиску і для акселерометра. Тому головна операція тут – нормування відносно індивідуальних допустимих характеристик кожного каналу. При цьому вагові коефіцієнти не можна призначати довільно. Для критичних застосувань їх краще пов’язувати з бюджетом невизначеності, з тим, наскільки результат системи чутливий до конкретного каналу, і з наслідками помилкового вимірювального рішення. Оцінювання невизначеності в сенсорних мережах і питання простежуваності – це окремий сучасний напрям мережевої метрології [2], [6].

Ми розробили інтерактивний блокнот на Python в Google Colab, у якому можна змінювати дев’ять параметрів: швидкість дрейфу, зростання шуму, зміну чутливості, інтенсивність прискореної деградації вібраційного каналу, момент її початку, крутизну функції надійності, рівень попередження, довжину вікна аналізу та реалізацію випадкового процесу. Він дозволяє дослідити як та сама система переходить від стабільного стану до різних сценаріїв деградації.

Ще один напрям розвитку роботи – автоматично розпізнавати тип часового патерну: повільний монотонний дрейф, прискорену деградацію, стрибкоподібну зміну, збільшення дисперсії або їх поєднання. Для адаптації до складної динаміки дрейфу вже використовують сучасні методи машинного навчання. Наприклад, AutoML-підхід 2025 року поєднує метанавчання, ансамблювання, оптимізацію гіперпараметрів і вибір ознак, щоб компенсувати різні рівні сенсорного дрейфу [1]. Проте в інтелектуальній інформаційно-вимірювальній системі такі методи, на нашу думку, треба застосовувати не замість метрологічних критеріїв, а поверх набору характеристик, які можна інтерпретувати.

На практиці запропоновану технологію можна використати для адаптивного планування метрологічного підтвердження. Замість одного фіксованого інтервалу для всіх каналів система може видавати попередження для конкретного каналу тоді, коли прогнозований залишковий ресурс його метрологічної придатності стає малим. Це відповідає підходу ISO 10012:2026, який встановлює вимоги до системи менеджменту вимірювань, щоб забезпечити довіру до результатів і керувати ризиками вимірювальних процесів [3]. Попередню редакцію ISO 10012:2003 у лютому 2026 року замінило друге видання стандарту, тому в роботі ми посилаємося саме на актуальну версію 2026 року [3].

Для практичного впровадження також потрібно забезпечити простежуваність історії характеристик. Кожне значення індексу має бути пов’язане з результатами калібрування або перевірки, умовами експлуатації, оціненою невизначеністю та версією моделі прогнозування. На важливість цих складових для мережевих вимірювань прямо вказують настанови щодо якості даних, невизначеності та простежуваності в сенсорних мережах, підготовлені в межах європейського метрологічного проєкту FunSNM [6].

Висновки. У роботі запропоновано інтелектуальну технологію оцінювання метрологічної надійності гетерогенних вимірювальних каналів

на основі часових патернів зміщення, шуму та чутливості. Нормування характеристик відносно індивідуальних допустимих рівнів дає змогу аналізувати разом канали різної фізичної природи. Модельний експеримент показав, що прискорену деградацію можна виявити заздалегідь і спрогнозувати момент втрати метрологічної придатності. Надалі ми плануємо займатися автоматичною класифікацією патернів деградації, побудовою інтервалів невизначеності для прогнозованого залишкового ресурсу, урахуванням кореляції між каналами та розробленням адаптивних інтервалів метрологічного підтвердження.

Література:

1. Schaller M., Kruse M., Ortega A., Lindauer M., Rosenhahn B. AutoML for multi-class anomaly compensation of sensor drift. *Measurement*. 2025. Vol. 250. Art. 117097. DOI: 10.1016/j.measurement.2025.117097. URL: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2025.117097 (дата звернення: 27.09.2026).

2. Harris P. M. et al. Measurement Uncertainty Evaluation for Sensor Network Metrology. *Metrology*. 2025. Vol. 5, No. 1. Art. 3. URL: https://www.mdpi.com/2673-8244/5/1/3 (дата звернення: 27.09.2026).

3. ISO 10012:2026. *Quality management – Requirements for measurement management systems*. 2nd ed. Geneva : International Organization for Standardization, 2026. URL: https://www.iso.org/standard/10012 (дата звернення: 27.09.2026).

4. Shangguan Y.-Y., Chen S.-S., Chen W.-B., Sun F.-Q., Li X.-Y. A belief reliability-guided predictive calibration framework for accelerometers. *Reliability Engineering & System Safety*. 2026. Art. 113065. DOI: 10.1016/j.ress.2026.113065. URL: https://doi.org/10.1016/j.ress.2026.113065 (дата звернення: 27.09.2026).

5. SDI: A sparse drift identification approach for force/torque sensor calibration in industrial robots. *Neurocomputing*. 2025. Vol. 620. Art. 129292. DOI: 10.1016/j.neucom.2024.129292. URL:

https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.129292 (дата звернення: 27.09.2026).

6. Johansen M., Vaa M., Tabandeh S. et al. *Guidelines for data quality, measurement uncertainty, and traceability in sensor networks*. EPM 22DIT02 FunSNM. 2025. URL: https://zenodo.org/records/17412254 (дата звернення: 27.09.2026).

Секція 2

Пристрої і методи вимірювання та контролю параметрів потенціально небезпечних процесів. Метрологічне забезпечення безпеки життєдіяльності

***Вдовіна Катерина**, студентка гр. ММ-51-26*

Науковий керівник: доц. ***Коваль А. О.***

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

МЕТОД САМОДІАГНОСТУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ДАТЧИКІВ ЗА БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИМИ ПАТЕРНАМИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ І СЛУЖБОВИХ ДАНИХ

Розвиток інтелектуальних інформаційно-вимірювальних систем супроводжується перенесенням частини функцій контролю якості даних безпосередньо на рівень датчика. Сучасний інтелектуальний датчик формує не лише результат вимірювання, а й службову інформацію про температуру електронних компонентів, параметри живлення, стан обміну даними та внутрішні режими функціонування. Це створює передумови для самодіагностування, за якого висновок про працездатність формується не за одним порогом, а за сукупним патерном вимірювальних і службових ознак.

Актуальність багатопараметричного підходу підтверджується сучасними дослідженнями. Skålvik та співавтори поєднують автоматичний контроль окремих сенсорів із багатопараметричними тестами та показують можливість формувати пояснюваний діагностичний висновок безпосередньо на сенсорному вузлі [1]. У роботі Gao, Li та Liang багатовимірний аналіз поєднано з глибоким навчанням для виявлення та діагностування несправностей датчиків [2]. Дослідження Qiu та співавторів демонструє доцільність спільного використання часових і просторових залежностей для онлайн-діагностування дрейфу, зміщення та зависання показів [3].

Мета роботи – розробити та дослідити метод самодіагностування інтелектуального датчика за багатопараметричним патерном вимірювальних і службових даних із формуванням інтегрального індексу аномальності та показника довіри до результату вимірювання.

У запропонованій моделі діагностичний вектор містить шість нормованих ознак: залишок між виміряним і прогнозованим значеннями; рівень шуму; зміну чутливості; температуру електроніки; відхилення напруги живлення; інтенсивність помилок обміну. Таке об’єднання принципово відрізняє самодіагностування від контролю лише вимірювального сигналу. Наприклад, зростання залишку одночасно зі зміною чутливості характерне для дрейфу, тоді як збільшення помилок обміну за відносно стабільних метрологічних ознак вказує на інший механізм порушення.

Інтегральний індекс діагностичної аномальності визначається як

$$D(k) = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} w_j z_j^2(k)}, \qquad \sum_{j=1}^{m} w_j = 1, \tag{1}$$

де $D(k)$ – індекс аномальності;

$z_j(k)$ – нормована j-та діагностична ознака;

w_j – її ваговий коефіцієнт;

m – кількість ознак.

Нормування потрібне для спільного аналізу параметрів різної фізичної природи. Ваги відображають діагностичну значущість ознак і в реальній системі повинні встановлюватися за результатами калібрувальних та експлуатаційних досліджень.

Для представлення результату самодіагностування у формі, придатній для використання верхнім рівнем інформаційно-вимірювальної системи, введено показник довіри

$$C(k) = \exp[-\beta D^2(k)], \tag{2}$$

де $C(k)$ – показник довіри до поточного результату;

β – коефіцієнт чутливості.

Значення $C(k)$ не є метрологічною характеристикою або нормативно встановленою ймовірністю. У роботі воно використовується як дослідницький індикатор ступеня узгодженості поточного багатопараметричного патерну зі штатним станом.

Модельний експеримент містить шість послідовних режимів: штатний стан, дрейф, температурний вплив, погіршення живлення, нестабільність обміну та комплексну деградацію. Для кожного режиму змінюється не одна ознака, а характерна їх комбінація. Така постановка ближча до реального інтелектуального датчика, де одна фізична причина може одночасно проявлятися у вимірювальному тракті, електроніці та комунікаційному інтерфейсі.

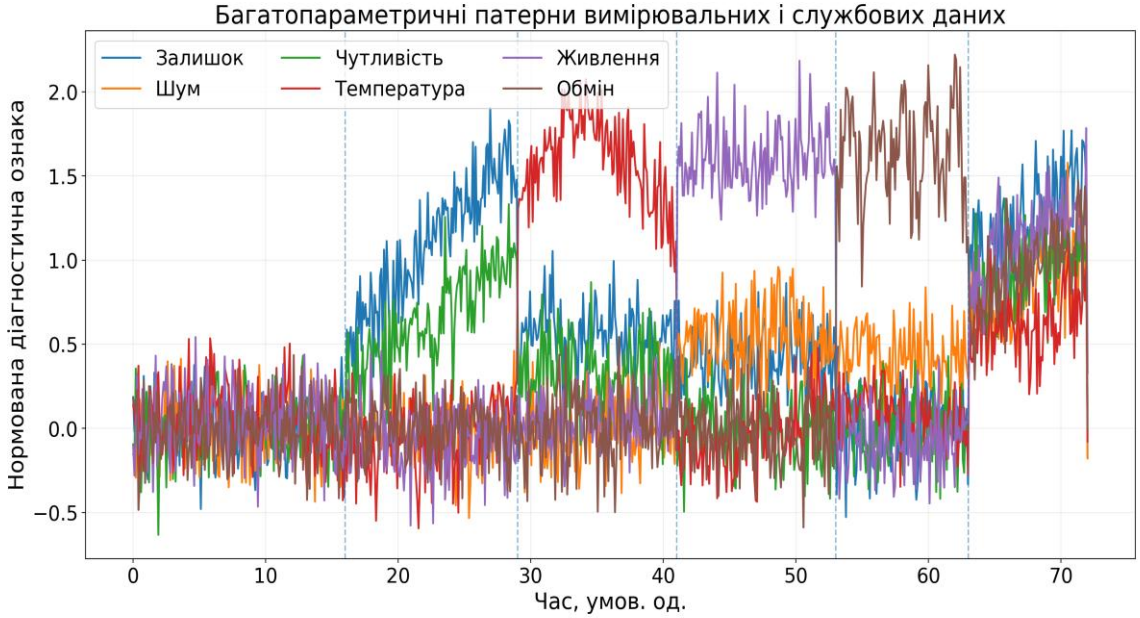


Рисунок 1 – Багатопараметричні патерни вимірювальних і службових даних інтелектуального датчика

На рис. 1 видно, що різні порушення мають відмінну структуру. У режимі дрейфу домінують залишок та зміна чутливості. Температурний

вплив формує підвищення внутрішньої температури разом зі зміною метрологічних ознак. Погіршення живлення супроводжується відхиленням службового параметра живлення, зростанням шуму та залишку. Нестабільність обміну найбільш виразно проявляється у статистиці комунікаційних помилок. Комплексна деградація характеризується одночасним погіршенням більшості ознак.

Для базової модельної реалізації середні значення індексу D становлять приблизно 0,175 для штатного стану; 0,623 для дрейфу; 0,671 для температурного впливу; 0,707 для погіршення живлення; 0,681 для нестабільності обміну та 1,030 для комплексної деградації. Отже, однакове значення інтегрального індексу ще не визначає тип несправності. Для локалізації причини необхідно аналізувати сам багатопараметричний патерн. Саме розділення задач «виявити аномалію» та «визначити її джерело» є важливим напрямом сучасної діагностики багатовимірних сенсорних систем [4].

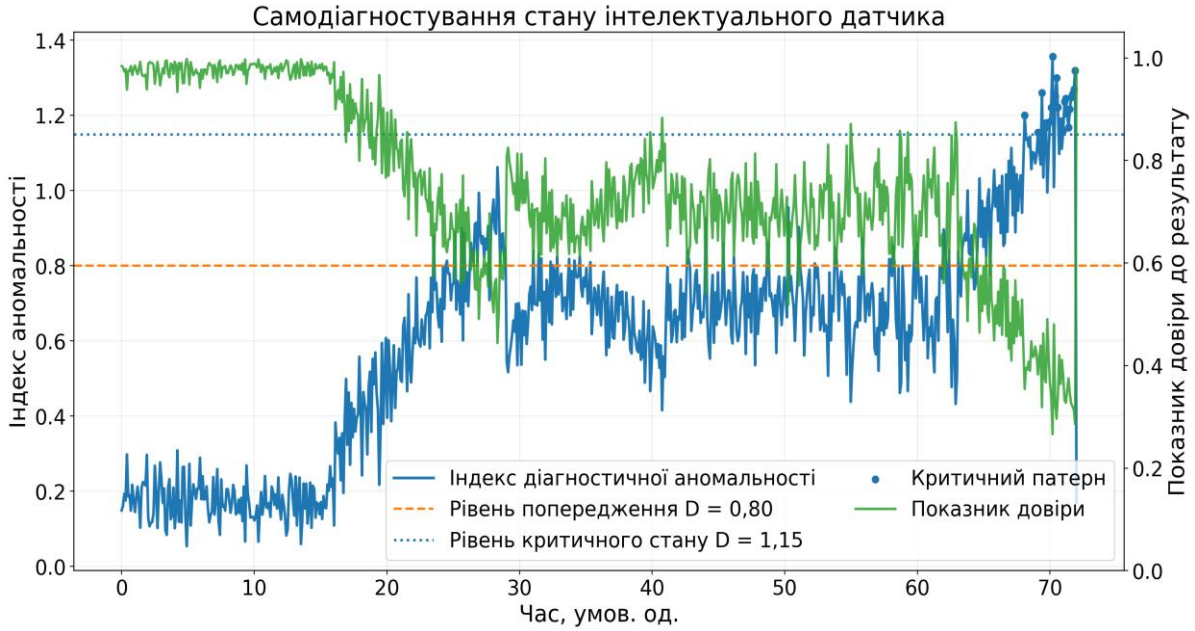


Рисунок 2 – Інтегральний індекс аномальності та показник довіри до результату

На рис. 2 індекс $D(k)$ порівнюється з двома дослідницькими рівнями: 0,80 – попередження та 1,15 – критичний стан. Ці значення не є нормативними і використовуються лише для дослідження поведінки алгоритму. У базовій реалізації критичний рівень перевищено у 22 із 720 відліків. Мінімальне значення показника довіри становить приблизно 0,266, а медіанне – 0,732. Зменшення $C(k)$ відбувається не через одиничне перевищення одного службового параметра, а зі зростанням узгодженої багатопараметричної аномальності.

Такий підхід дозволяє реалізувати багаторівневу логіку самодіагностування. На першому рівні оцінюється відхилення окремих ознак; на другому формується інтегральний індекс; на третьому аналізується структура патерну для розпізнавання ймовірної причини. Схожий принцип поєднання локальних і часових ознак використовується в сучасних гібридних методах діагностування датчиків [5]. Для онлайн-застосувань також досліджується спільне використання прогнозування часових рядів, віртуального калібрування та механізмів голосування [6].

Дослідницька частина роботи спрямована на перевірку стійкості методу до зміни інтенсивності несправностей і шуму. В інтерактивному блокноті окремо змінюються інтенсивність дрейфу, температурного впливу, погіршення живлення, нестабільності обміну, рівень випадкових флуктуацій, рівні попередження і критичного стану, чутливість показника довіри та реалізація випадкового процесу. Після кожного експерименту пояснення під графіками формуються за фактичними числовими результатами.

Важливою властивістю методу є можливість його реалізації безпосередньо в інтелектуальному перетворювачі. Сучасні промислові передавачі мають обчислювальні ресурси, які можуть використовуватися для локального аналізу даних і виявлення порушень без додаткового апаратного забезпечення [7]. Це дозволяє передавати верхньому рівню не лише виміряне значення, а й службовий діагностичний пакет: індекс аномальності, показник

довіри, код найбільш імовірного стану та набір ознак, які сформували рішення.

Перспективним розвитком є перехід від фіксованих ваг до адаптивної моделі. За штатної роботи можна накопичувати багатовимірний еталонний патерн і оцінювати не тільки амплітуду відхилення, а й кореляційну структуру ознак. Це дозволить відрізняти локальну несправність датчика від реальної зміни контрольованого процесу. Актуальність такого розділення підтверджується сучасними роботами з ієрархічної атрибуції залишків, де окремо вирішуються задачі виявлення аномалії, визначення сенсорного або процесного джерела та локалізації ураженого каналу [4].

Практичне застосування запропонованого підходу потребує також збереження простежуваності діагностичних рішень. Разом із результатом вимірювання доцільно реєструвати значення службових параметрів, версію діагностичної моделі, використані пороги та причину зміни показника довіри. Це робить самодіагностування пояснюваним і дає можливість перевірити рішення під час метрологічного підтвердження або технічного обслуговування.

Висновки. Запропоновано метод самодіагностування інтелектуального датчика за спільним аналізом вимірювальних і службових даних. На відміну від однопараметричного порогового контролю, метод використовує структуру багатопараметричного патерну, інтегральний індекс аномальності та показник довіри. Модельне дослідження показало можливість розділення характерних проявів дрейфу, температурного впливу, погіршення живлення, нестабільності обміну та комплексної деградації. Подальші дослідження доцільно спрямувати на автоматичне навчання ваг, оцінювання невизначеності діагностичного рішення, розділення сенсорних і процесних аномалій та експериментальну перевірку на реальному інтелектуальному датчику.

Література:

1. Skålvik A. M., Bjørk R. N., Martínez E., Frøysa K. E., Sætre C. Multivariate, Automatic Diagnostics Based on Insights into Sensor Technology. *Journal of Marine Science and Engineering*. 2024. Vol. 12, No. 12. Art. 2367. DOI: 10.3390/jmse12122367. URL: https://doi.org/10.3390/jmse12122367 (дата звернення: 25.09.2026).

2. Gao L., Li D., Liang N. A hybrid sensor fault detection and diagnosis method for air-handling unit based on multivariate analysis merged with deep learning. *Advanced Engineering Informatics*. 2025. Vol. 65, Part D. Art. 103360. DOI: 10.1016/j.aei.2025.103360. URL: https://doi.org/10.1016/j.aei.2025.103360 (дата звернення: 25.09.2026).

3. Qiu Z., Liu J., Yang H., Li Q., Zhang Y. Online sensor fault diagnosis method based on time series prediction and independent component naive Bayesian classifier. *Measurement Science and Technology*. 2026. Vol. 37, No. 2. Art. 025108. DOI: 10.1088/1361-6501/ae2e2e. URL: https://doi.org/10.1088/1361-6501/ae2e2e (дата звернення: 25.09.2026).

4. Hierarchical Residual Attribution with Supervised Channel Shortlisting for Sensor-Local and Process Fault Diagnosis in Multivariate Sensor Time Series. *Sensors*. 2026. Vol. 26, No. 15. Art. 4986. URL: https://www.mdpi.com/1424-8220/26/15/4986 (дата звернення: 25.09.2026).

5. Yu W. et al. Sensor fault diagnosis based on a passive observer and hybrid CNN-GRU model for intelligent ships. *Transportation Safety and Environment*. 2025. Vol. 7, No. 3. Art. tdaf034. DOI: 10.1093/tse/tdaf034. URL: https://doi.org/10.1093/tse/tdaf034 (дата звернення: 25.09.2026).

6. Li J., Wang J., Wang P., Yoon S., Li Y., Rezgui Y., Li Y., Zhao T. Sensor fault diagnosis and calibration based on voting mechanism for online application using virtual in-situ calibration and time series prediction. *Building and Environment*. 2025. Vol. 278. Art. 113040. DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.113040. URL: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2025.113040 (дата звернення: 25.09.2026).

7. Adding Smart Functions to an Industry-grade Transducer for Process Fault Detection without Modifying Footprint. *IFAC-PapersOnLine*. 2024. Vol. 58, No. 4. P. 574-579. DOI: 10.1016/j.ifacol.2024.07.280. URL: https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.07.280 (дата звернення: 25.09.2026).

Студент гр. ММ-41-23 ***Волков Максим***

Науковий керівник: к.т.н., доц. ***Коваль О. А.***

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОСТОРОВОЇ ВІДСТАНІ МІЖ ВИМІРЮВАЛЬНИМИ КАНАЛАМИ НА ДОСТОВІРНІСТЬ КОНТРОЛЮ МЕХАНІЧНИХ КОЛИВАНЬ ПРОТЯЖНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Просторово розподілені інформаційно-вимірювальні системи використовують тоді, коли стан протяжного об’єкта неможливо достатньо повно оцінити за результатами вимірювання лише в одній точці. Для контролю механічних коливань мостів, балок, рам та інших конструкцій уздовж об’єкта розміщують декілька вимірювальних каналів. Кожний канал реєструє коливання у своїй точці, а сукупність результатів дозволяє оцінити просторовий характер коливального процесу.

Одним із важливих параметрів такої системи є відстань між сусідніми вимірювальними каналами. Зменшення цієї відстані збільшує кількість отриманих даних і дозволяє детальніше відтворити форму коливань, але одночасно збільшує кількість датчиків, ліній зв’язку та обсяг даних. Надто велика відстань між каналами, навпаки, може призвести до пропуску локальних максимумів і мінімумів коливань. Тому вибір просторового кроку є важливим завданням під час побудови розподіленої вимірювальної системи [1], [2].

Мета роботи – дослідити, як відстань між вимірювальними каналами впливає на достовірність відтворення механічних коливань протяжної конструкції.

Для дослідження розроблено модель конструкції довжиною 30 м. Уздовж неї формувалося просторове поле механічних коливань, що містило декілька складових різної просторової форми. Вимірювальні канали розташовувалися рівномірно, а відстань між ними змінювалася від 1 м до 7,5 м. Такий підхід дозволяє без використання експериментального стенда дослідити, як зміна кількості точок вимірювання впливає на відтворення коливань. Подібні задачі вибору кількості та положення датчиків розглядаються в сучасних роботах із моніторингу конструкцій [3], [4].

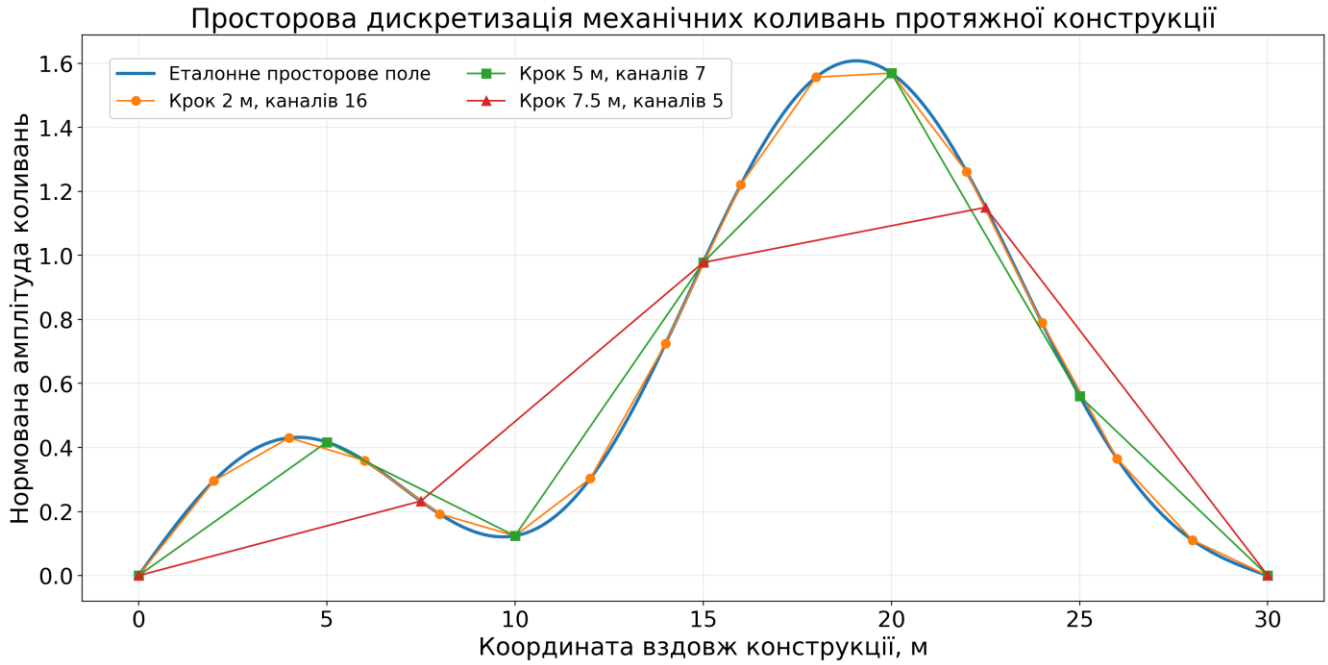


Рисунок 1 – Відтворення механічних коливань за різної відстані між вимірювальними каналами

На рис. 1 наведено еталонний розподіл амплітуди коливань уздовж конструкції та точки вимірювання для декількох варіантів розміщення каналів. За кроку 2 м вимірювальні точки досить детально описують форму коливань. При збільшенні відстані до 5 м кількість каналів зменшується,

тому окремі ділянки просторового поля відтворюються менш детально. За кроку 7,5 м система містить лише п’ять каналів, унаслідок чого частина локальних змін амплітуди практично не фіксується.

Для кількісного порівняння використано середньоквадратичну похибку реконструкції

$$E = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(y_i - \hat{y}_i)^2}, \qquad (1)$$

де y_i – еталонне значення амплітуди коливань;

$\hat{y}_i$ – значення, відновлене за результатами просторово розподілених вимірювань;

N – кількість точок порівняння.

Чим менше значення E, тим точніше система відтворює просторовий характер коливань.

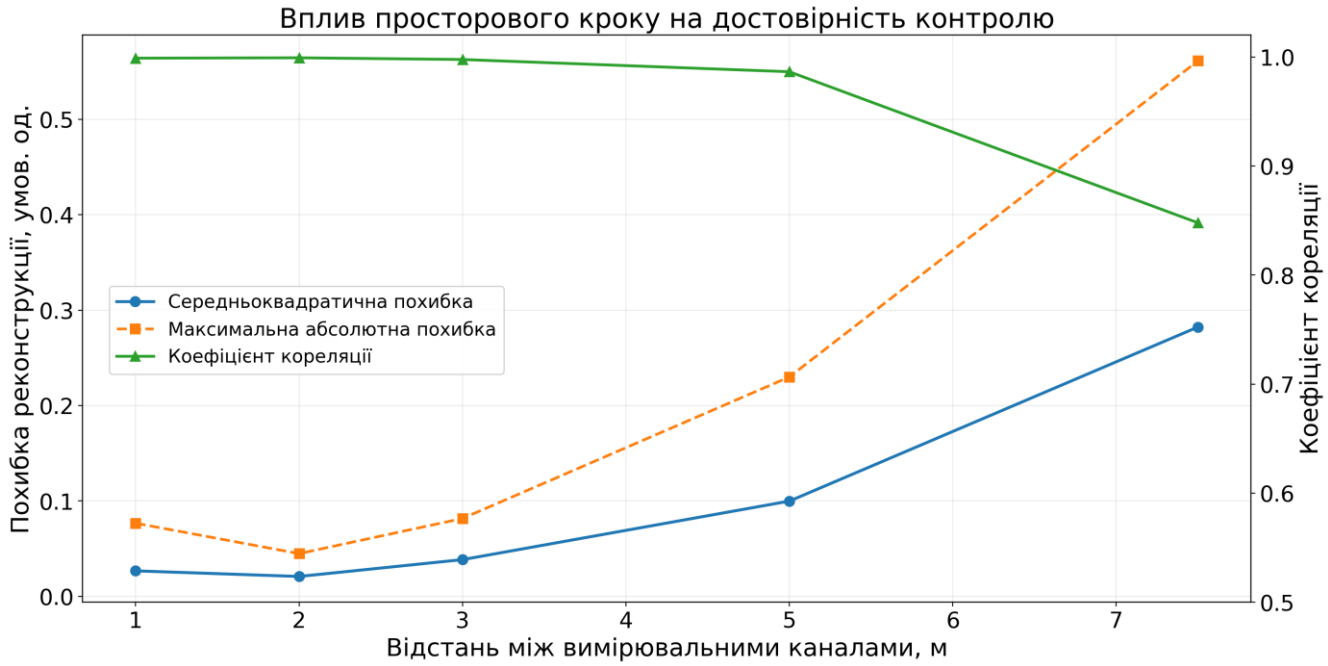


Рисунок 2 – Вплив відстані між вимірювальними каналами на точність відтворення коливань

Результати на рис. 2 показують, що за невеликої відстані між каналами похибка реконструкції залишається малою. Для кроку 2 м середньоквадратична похибка становить близько 0,021 умовної одиниці, а коефіцієнт кореляції між еталонним та відновленим сигналами перевищує 0,999. За кроку 5 м середньоквадратична похибка зростає приблизно до 0,100, хоча загальна форма коливань ще відтворюється достатньо добре. Подальше збільшення відстані до 7,5 м приводить до зростання похибки до 0,282 та зменшення коефіцієнта кореляції приблизно до 0,848.

Отримані результати показують, що кількість вимірювальних каналів не слід вибирати лише з умови мінімізації їх кількості. Необхідно враховувати характер просторової зміни контрольованої величини. Якщо конструкція має складну форму коливань із декількома локальними максимумами, відстань між каналами повинна бути меншою. Аналогічний підхід використовується в сучасних системах моніторингу, де розташування датчиків вибирають з урахуванням інформативності отриманих вимірювань [5], [6].

Для демонстрації результатів розроблено інтерактивний блокнот Google Colab. У ньому можна змінювати довжину конструкції, відстань між каналами, рівень шуму та параметри механічних коливань. Після зміни умов експерименту автоматично перебудовуються графіки та розраховуються похибки відтворення. Це дозволяє наочно показати, як збільшення або зменшення кількості просторово розподілених вимірювальних каналів впливає на результат контролю.

Висновки. Проведене моделювання показало, що відстань між вимірювальними каналами суттєво впливає на достовірність контролю механічних коливань протяжної конструкції. За малого просторового кроку форма коливань відтворюється з високою точністю. Зі збільшенням відстані між каналами зменшується кількість вимірювальної інформації та зростає ймовірність пропуску локальних змін. Тому просторовий крок доцільно

вибирати з урахуванням характеру коливань конструкції та допустимої похибки їх відтворення.

Література:

1. Sun Z., Mahmoodian M., Sidiq A., Jayasinghe S., Shahrivar F., Setunge S. Optimal Sensor Placement for Structural Health Monitoring: A Comprehensive Review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2025. Vol. 14, No. 2. Art. 22. DOI: 10.3390/jsan14020022. URL: https://doi.org/10.3390/jsan14020022 (дата звернення: 26.09.2026).

2. Wang Y., Chen Y., Yao Y., Ou J. Advancements in Optimal Sensor Placement for Enhanced Structural Health Monitoring: Current Insights and Future Prospects. *Buildings*. 2023. Vol. 13, No. 12. Art. 3129. DOI: 10.3390/buildings13123129. URL: https://doi.org/10.3390/buildings13123129 (дата звернення: 26.09.2026).

3. Nicoletti V., Quarchioni S., Amico L., Gara F. Assessment of different optimal sensor placement methods for dynamic monitoring of civil structures and infrastructures. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2024. DOI: 10.1080/15732479.2024.2383299. URL: https://doi.org/10.1080/15732479.2024.2383299 (дата звернення: 26.09.2026).

4. Optimal sensor placement and Bi-type response reconstruction for structural health monitoring using long-gauge FBG strain sensing network. *Structures*. 2024. Vol. 63. Art. 106406. DOI: 10.1016/j.istruc.2024.106406. URL: https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106406 (дата звернення: 26.09.2026).

5. Kim S.-H., Kyung J., An J.-H., Eun H.-C. Hybrid Sensor Placement Framework Using Criterion-Guided Candidate Selection and Optimization. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 14. Art. 4513. DOI: 10.3390/s25144513. URL: https://doi.org/10.3390/s25144513 (дата звернення: 26.09.2026).

6. Saeed S., Sajid S. H., Chouinard L. Optimal Sensor Placement for Enhanced Efficiency in Structural Health Monitoring of Medium-Rise Buildings. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 17. Art. 5687. DOI: 10.3390/s24175687. URL:

https://doi.org/10.3390/s24175687 (дата звернення: 26.09.2026).

Студентка гр. ММ-41-23 ***Галкіна Тетяна***
Науковий керівник: к.т.н., доц. ***Коваль О. А.***
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

МЕТОД КОМПЕНСАЦІЇ ЧАСОВОЇ НЕУЗГОДЖЕНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЇ

Просторово розподілена система контролю вібрації одночасно використовує декілька вимірювальних каналів, установлених у різних точках конструкції. Для правильного порівняння їх сигналів важливо, щоб відліки відповідали однаковим моментам часу. На практиці між каналами можуть виникати невеликі часові зміщення через незалежні тактові генератори, затримки передавання даних або особливості роботи пристроїв збору інформації. Для вібраційних сигналів навіть невелика неузгодженість змінює взаємне положення максимумів і фазу коливань.

Проблема синхронізації особливо важлива для бездротових систем моніторингу, у яких окремі сенсорні вузли працюють як самостійні пристрої збору даних [1, 2]. Дослідження показують, що часова неузгодженість може погіршувати визначення форм коливань, тому поряд з апаратною синхронізацією застосовують коригування вже зареєстрованих сигналів [3, 4].

Мета роботи – дослідити вплив часової неузгодженості вимірювальних каналів на результати контролю вібрації та оцінити ефективність компенсації часових зміщень сигналів.

У модельному експерименті розглянуто шість вимірювальних каналів, які реєструють один вібраційний процес. Частота дискретизації становить

1000 Гц, основна частота вібрації – 18 Гц. Для каналів задаються різні часові зміщення від 0 до 6,8 мс та невеликий вимірювальний шум. Перший канал використовується як часовий орієнтир.

Часове зміщення двох сигналів можна подати як

$$\Delta t_i = t_i - t_{\text{оп}}, \qquad (1)$$

де Δt_i – затримка i-го каналу;

t_i – момент появи характерної ділянки сигналу в цьому каналі;

$t_{\text{оп}}$ – відповідний момент в опорному каналі.

Після визначення Δt_i сигнал зміщується вздовж часової осі у протилежному напрямку.

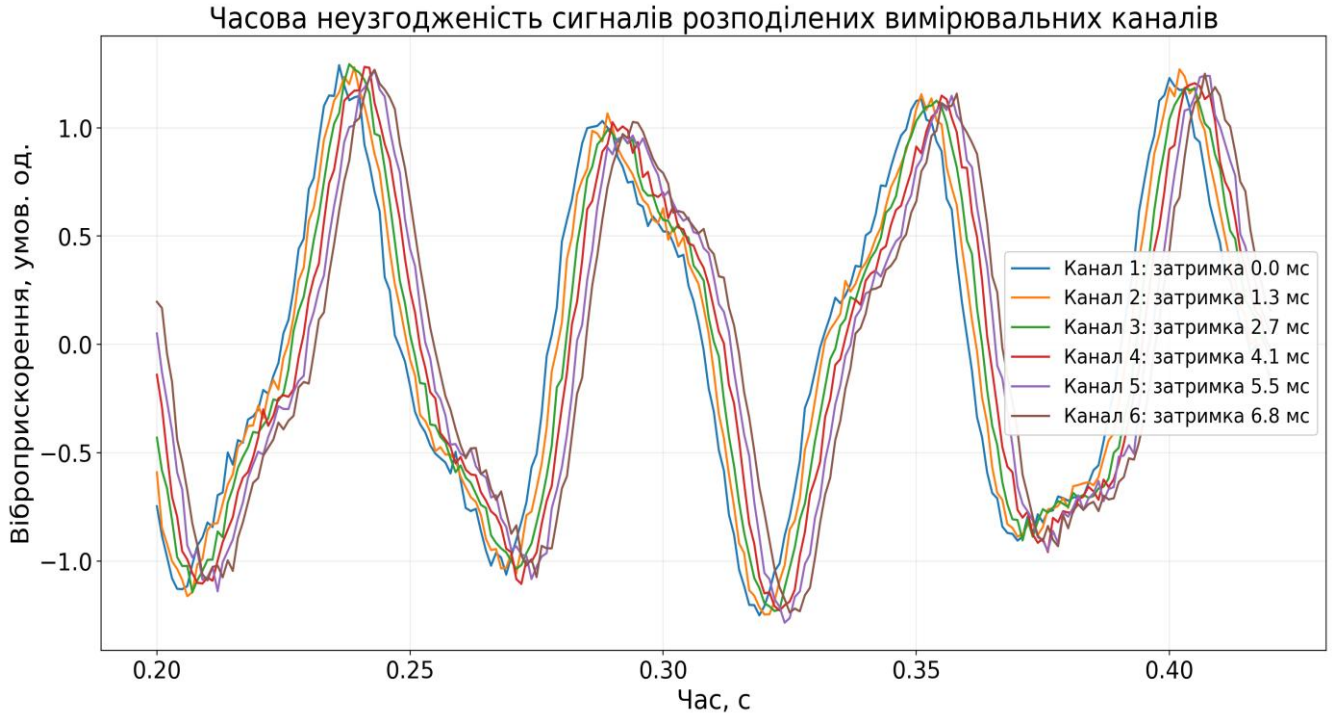


Рисунок 1 – Часова неузгодженість сигналів просторово розподілених вимірювальних каналів

На рис. 1 наведено фрагмент сигналів шести каналів до компенсації. Усі канали вимірюють один процес, однак через часові затримки їх максимуми, мінімуми та переходи через нуль не збігаються. Чим більшою є затримка, тим помітніше сигнал зміщується відносно опорного каналу. За основної частоти 18 Гц затримка 6,8 мс уже створює добре помітне фазове зміщення. Подібні часові відхилення є суттєвими для вібраційного моніторингу, оскільки синхронність каналів необхідна для коректного спільного аналізу їх даних [1, 3].

У запропонованому модельному методі спочатку оцінюється часове зміщення кожного каналу відносно опорного, після чого сигнал переноситься на спільну часову шкалу. Для дискретних даних проміжні значення визначаються інтерполяцією. Такий підхід належить до післявимірювальної компенсації: апаратна частина каналів не змінюється, а вирівнювання виконується під час обробки даних. Сучасні дослідження структурного моніторингу також розглядають післявимірювальну синхронізацію як доповнення до апаратних і мережевих засобів [3, 5].

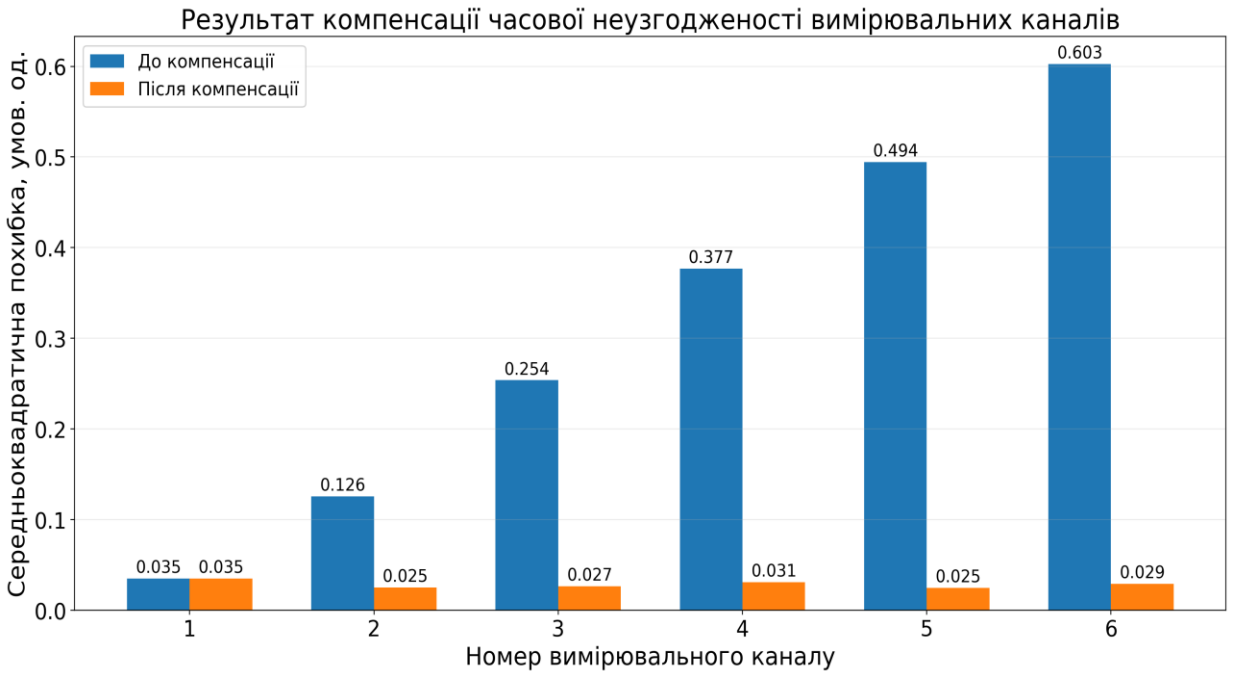


Рисунок 2 – Похибка вимірювальних каналів до та після компенсації часової неузгодженості

На рис. 2 порівняно середньоквадратичну похибку сигналів до та після компенсації. Для опорного каналу вона визначається переважно вимірювальним шумом і становить близько 0,035 умовної одиниці. Зі збільшенням часової затримки похибка некомпенсованих каналів зростає: для шостого каналу вона досягає приблизно 0,603 умовної одиниці. Після вирівнювання для каналів 2-6 похибка зменшується приблизно до 0,025-0,031 умовної одиниці. Отже, основна частина відмінностей між сигналами в цьому експерименті була спричинена саме часовою неузгодженістю.

На практиці повністю усунути часові розбіжності складніше. Внутрішні годинники сенсорних вузлів можуть дрейфувати, а затримки передавання даних – змінюватися. Тому використовують мережеву синхронізацію, зовнішні часові сигнали або періодичне коригування даних [1, 2, 6]. Для задач контролю вібрації доцільним є поєднання початкової синхронізації вузлів із перевіркою та коригуванням записаних сигналів.

Розроблена інтерактивна модель інформаційно-вимірювальної системи дозволяє змінювати основну частоту вібрації, максимальну часову неузгодженість, рівень шуму, додатковий дрейф затримки та ефективність компенсації. Що дозволяє проводити комплексні дослідження неузгодженості вимірювальних каналів.

Висновки. Моделювання показало, що часова неузгодженість вимірювальних каналів може суттєво змінювати результати спільного аналізу вібраційних сигналів. Зі збільшенням часової затримки зростає відмінність сигналу від опорного каналу. Компенсація шляхом оцінювання затримки та перенесення сигналів на спільну часову шкалу істотно зменшує цю похибку. Такий підхід може бути використаний як етап попередньої обробки даних у просторово розподіленій системі контролю вібрації.

Література:

1. GPS-Based Network Synchronization of Wireless Sensors for Extracting

Propagation of Disturbance on Structural Systems. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 1. Art. 199. DOI: 10.3390/s24010199. URL: https://doi.org/10.3390/s24010199 (дата звернення: 26.09.2026).

2. Recent advances in wireless sensor networks for structural health monitoring of civil infrastructure. *Journal of Infrastructure Intelligence and Resilience*. 2024. Vol. 3, No. 1. Art. 100066. DOI: 10.1016/j.iintel.2023.100066. URL: https://doi.org/10.1016/j.iintel.2023.100066 (дата звернення: 26.09.2026).

3. Dragos K., Magalhães F., Manolis G. D., Smarsly K. Frequency-domain synchronization of structural health monitoring data. *Journal of Sound and Vibration*. 2024. Vol. 571. Art. 118017. DOI: 10.1016/j.jsv.2023.118017. URL: https://doi.org/10.1016/j.jsv.2023.118017 (дата звернення: 26.09.2026).

4. Robust and efficient synchronization for structural health monitoring data with arbitrary time lags. *Engineering Structures*. 2025. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0141029624017450 (дата звернення: 26.09.2026).

5. Wen R., Schoof E., Chapman A. Exponential convergence of time-of-arrival based network clock synchronization under practical assumptions. *Automatica*. 2024. Vol. 165. Art. 111672. DOI: 10.1016/j.automatica.2024.111672. URL: https://doi.org/10.1016/j.automatica.2024.111672 (дата звернення: 26.09.2026).

6. Enhancing Wireless Sensor Network in Structural Health Monitoring through TCP/IP Socket Programming-Based Mimic Broadcasting: Experimental Validation. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, No. 8. Art. 3494. DOI: 10.3390/app14083494. URL: https://doi.org/10.3390/app14083494 (дата звернення: 26.09.2026).

Студент гр. ММ-41-23 ***Макляк Василь***
Науковий керівник: к.т.н., доц. ***Коваль О. А.***
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ДОВЖИНИ ЛІНІЙ ЗВ'ЯЗКУ НА ПОХИБКИ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ДЕФОРМАЦІЇ КОНСТРУКЦІЙ

У просторово розподіленій системі контролю деформації датчики встановлюються в різних точках конструкції, тому відстань від них до пристрою збору даних може істотно відрізнятися. Для тензорезистивних датчиків це означає різну довжину з'єднувальних провідників. Їх електричний опір входить до вимірювального кола і може змінювати результат вимірювання. Особливо помітним цей вплив стає для віддалених каналів.

Сучасні системи моніторингу конструкцій використовують як електричні тензорезистивні канали, так і розподілені оптичні засоби вимірювання деформації [1-3]. Для резистивних датчиків важливо враховувати опір лінії та його температурну зміну. Трипровідне підключення застосовують саме для зменшення впливу опору з'єднувальних провідників [4]. У сучасних схемах дистанційного підключення резистивних датчиків також використовуються спеціальні способи компенсації опору ліній [5].

Мета роботи – дослідити вплив довжини лінії зв'язку на похибку вимірювального каналу контролю деформації та порівняти двопровідне і трипровідне підключення тензорезистивного датчика.

Для моделювання прийнято тензорезистор з номінальним опором 350 Ом і мідні провідники перерізом 0,22 мм². Дійсна деформація конструкції в базовому експерименті становить 500 мкм/м. Довжина лінії змінюється від

1 до 100 м, що відповідає умовам, коли датчики просторово розподіленої системи розташовані на різних відстанях від модуля збору даних.

Опір одного провідника визначається залежністю

$$R_л = \rho \frac{l}{S}, \qquad (1)$$

де $R_л$ – опір провідника;

ρ – питомий електричний опір матеріалу;

l – довжина лінії;

S – площа поперечного перерізу провідника.

Отже, зі збільшенням довжини лінії її опір зростає, а зі збільшенням перерізу – зменшується.

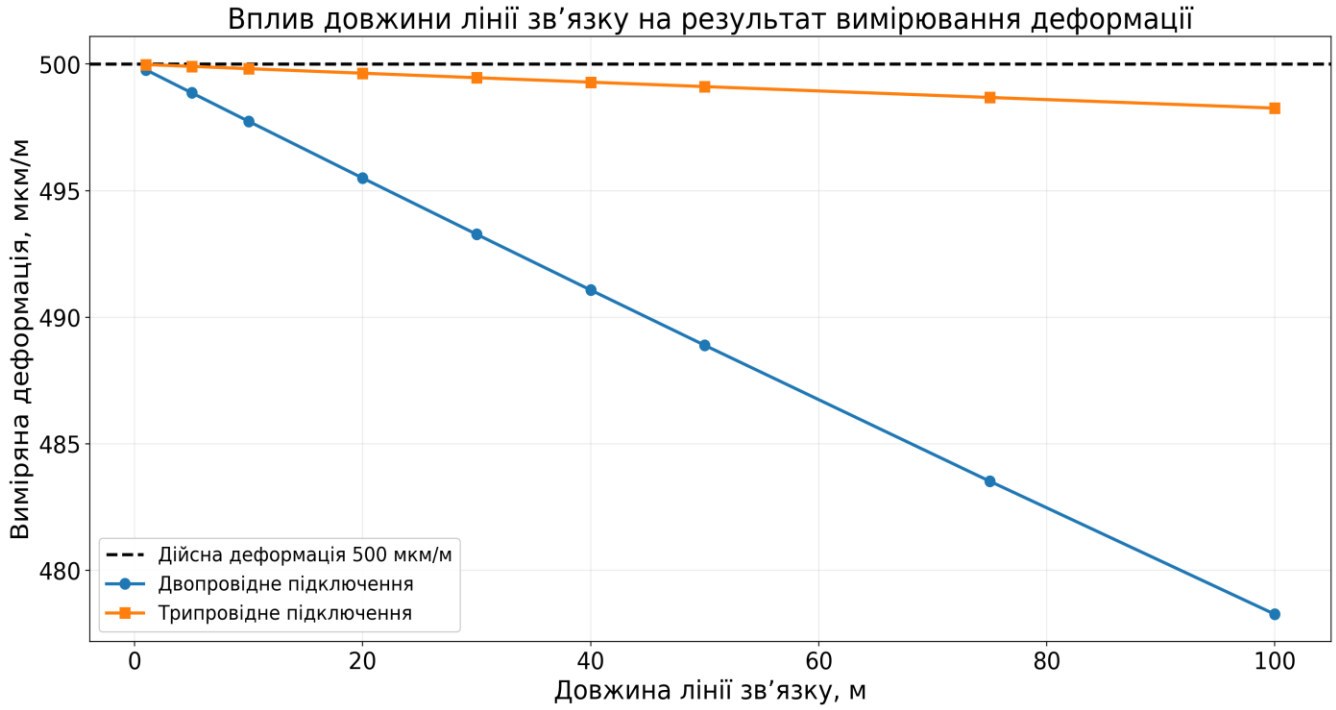


Рисунок 1 – Вплив довжини лінії зв'язку на результат вимірювання деформації

На рис. 1 показано, що для короткої лінії результат двопровідного підключення майже збігається з дійсним значенням деформації. Зі збільшенням довжини додатковий опір провідників знижує чутливість вимірювального каналу. Для лінії 50 м модель дає похибку близько 11,1 мкм/м, а для 100 м – близько 21,7 мкм/м. Трипровідне підключення істотно зменшує цю складову похибки, оскільки вплив близьких за параметрами провідників частково взаємно компенсується. Практичне застосування трипровідного підключення для зменшення впливу опору лінії підтверджується сучасними роботами з резистивними вимірювальними каналами [4, 5].

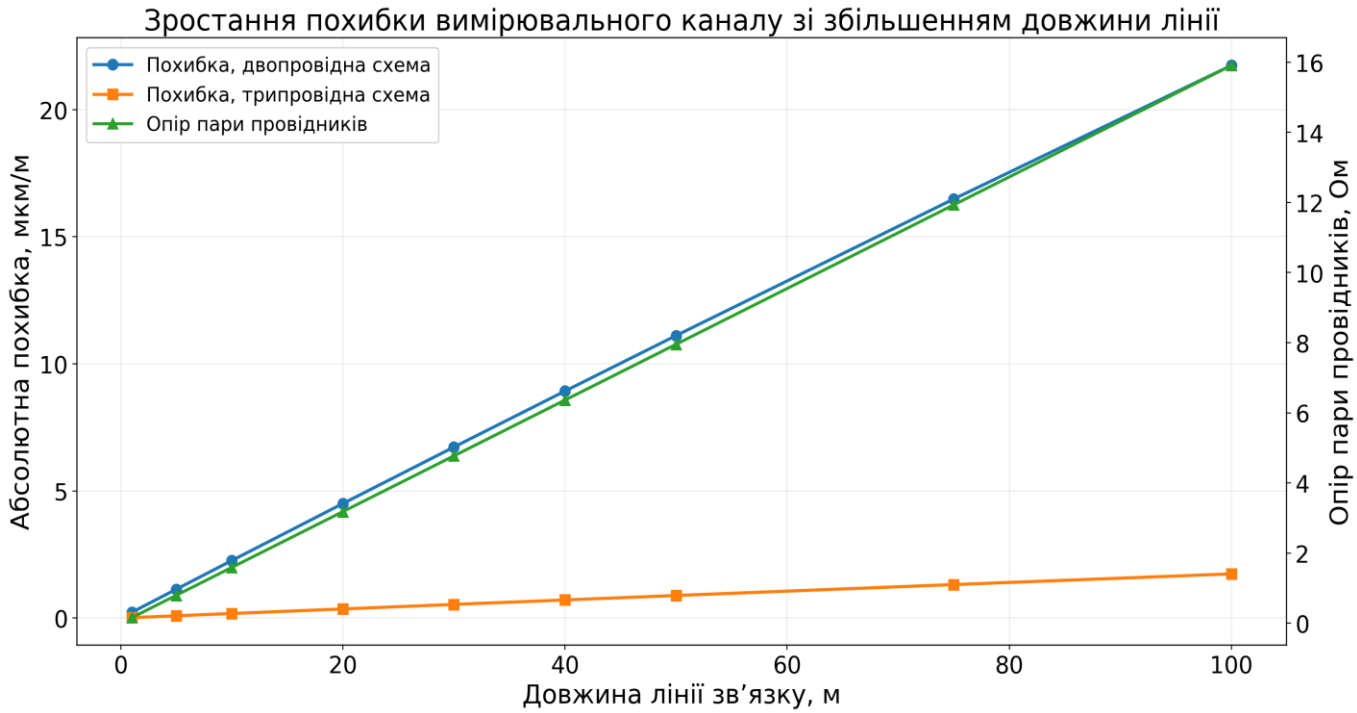


Рисунок 2 – Залежність похибки вимірювального каналу та опору лінії від її довжини

На рис. 2 одночасно показано зміну опору пари провідників та абсолютної похибки. Для прийнятого перерізу опір пари провідників збільшується приблизно від 0,16 Ом при довжині 1 м до 15,91 Ом при довжині 100 м. Відповідно збільшується і похибка двопровідного каналу. Для

трипровідної схеми в моделі залишено невелику некомпенсовану складову, оскільки в реальній системі опори провідників, контакти та температурні умови не є абсолютно однаковими. Саме симетричність опорів лінії є важливою умовою ефективної компенсації [4].

Отриманий результат важливий для просторово розподіленої системи. Якщо всі канали мають однакові датчики, але різну довжину ліній, їх похибки можуть бути неоднаковими. Тому два канали, встановлені в точках з однаковою деформацією, за несприятливих умов можуть формувати різні результати лише через параметри ліній зв’язку. Для великих конструкцій одним зі способів зменшення цієї проблеми є перенесення перетворення сигналу ближче до датчика або використання технологій розподіленого вимірювання. Сучасні оптичні системи дозволяють контролювати деформації на протяжних об’єктах і активно досліджуються для моніторингу мостів, бетонних конструкцій та транспортної інфраструктури [1-3, 6].

Для досліджень розроблено інтерактивний блокнот на Python в Google Colab. У ньому інтерактивно можна змінювати довжину лінії, площу перерізу провідника, опір тензорезистора, значення деформації, температуру лінії та ефективність компенсації трипровідної схеми. Це дозволяє показати, чому віддалені вимірювальні канали потребують урахування параметрів з’єднувальних ліній.

Висновки. Моделювання показало, що збільшення довжини лінії зв’язку призводить до зростання її електричного опору та похибки тензорезистивного вимірювального каналу. Найбільший вплив спостерігається при двопровідному підключенні. Трипровідна схема значно зменшує вплив опору лінії, але її ефективність залежить від однаковості параметрів провідників. Отже, під час побудови просторово розподіленої системи контролю деформації довжину і параметри ліній зв’язку доцільно враховувати як складову характеристик кожного вимірювального каналу.

Література:

1. King S., Jombo G., Simpson O., Duan W., Bowles A. Coaxial Cable Distributed Strain Sensing: Methods, Applications and Challenges. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 3. Art. 650. DOI: 10.3390/s25030650. URL: https://doi.org/10.3390/s25030650 (дата звернення: 25.09.2026).

2. Huang X., Zhang Z., Cheng T., Li J., Ma J. Distributed strain monitoring method for structural vibration based on multi-point acceleration measurement. *Measurement*. 2024. Vol. 230. Art. 114520. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114520. URL: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114520 (дата звернення: 25.09.2026).

3. Distributed fiber optic sensing for internal strain monitoring in full life cycle of concrete slabs with BOFDA technology. *Engineering Structures*. 2024. Vol. 305. Art. 117798. DOI: 10.1016/j.engstruct.2024.117798. URL: https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2024.117798 (дата звернення: 25.09.2026).

4. A preliminary study on multi-material fused filament fabrication of an embedded strain gauge for low-cost real-time monitoring of part strain. *Progress in Additive Manufacturing*. 2024. DOI: 10.1007/s40964-024-00582-4. URL: https://doi.org/10.1007/s40964-024-00582-4 (дата звернення: 25.09.2026).

5. Pallàs-Areny R. Two Proposals of a Simple Analog Conditioning Circuit for Remote Resistive Sensors with a Three-Wire Connection. *Sensors*. 2024. Vol. 24. DOI: 10.3390/s24020517. URL: https://doi.org/10.3390/s24020517 (дата звернення: 25.09.2026).

6. Research on distributed strain monitoring of a bridge based on a strained optical cable with weak fiber Bragg grating array. *Optics Express*. 2024. DOI: 10.1364/OE.518450. URL: https://doi.org/10.1364/OE.518450 (дата звернення: 25.09.2026).

Студент гр. ММ-41-23 ***Мельник Юрій***
Науковий керівник: к.т.н., доц. ***Коваль О. А.***
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПРОСТОРОВОГО ПОЛОЖЕННЯ ДЖЕРЕЛА МЕХАНІЧНОГО ЗБУРЕННЯ ЗА ЧАСОВИМИ ЗАТРИМКАМИ СИГНАЛІВ РОЗПОДІЛЕНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ

У просторово розподілених інформаційно-вимірювальних системах декілька вимірювальних каналів можуть реєструвати одне механічне збурення в різні моменти часу. Причиною є скінченна швидкість поширення механічної хвилі в конструкції. Канал, розташований ближче до джерела збурення, реєструє сигнал раніше, а більш віддалені канали – пізніше. Тому часові затримки між сигналами містять інформацію про координати джерела.

Такий принцип використовується для локалізації ударних впливів та джерел акустичної емісії. Сучасні дослідження підтверджують можливість визначення положення джерела за різницею часу приходу сигналів до просторово рознесених датчиків [1-3]. Водночас точність залежить від розміщення вимірювальних каналів, правильності визначення моменту приходу сигналу та прийнятого значення швидкості поширення хвилі [4, 5].

Мета роботи – дослідити можливість визначення просторових координат джерела механічного збурення за часовими затримками сигналів, отриманих просторово розподіленими вимірювальними каналами.

Для модельного дослідження розглянуто конструкцію розміром 12 м × 6 м, на якій розміщено шість вимірювальних каналів. Джерело механічного збурення задається всередині контрольованої області. Після виникнення збурення хвиля поширюється до кожного датчика, тому час її надходження залежить від відстані. Для базового експерименту прийнято ефективну швидкість поширення хвилі 3200 м/с.

Для двох каналів різниця часу приходу визначається простою залежністю

$$\Delta t_{ij} = t_i - t_j, \qquad (1)$$

де t_i і t_j – моменти реєстрації одного й того самого механічного збурення відповідно i-м та j-м вимірювальними каналами.

Знак і величина Δt_{ij} показують, до якого каналу джерело розташоване ближче та наскільки відрізняються шляхи поширення хвилі.

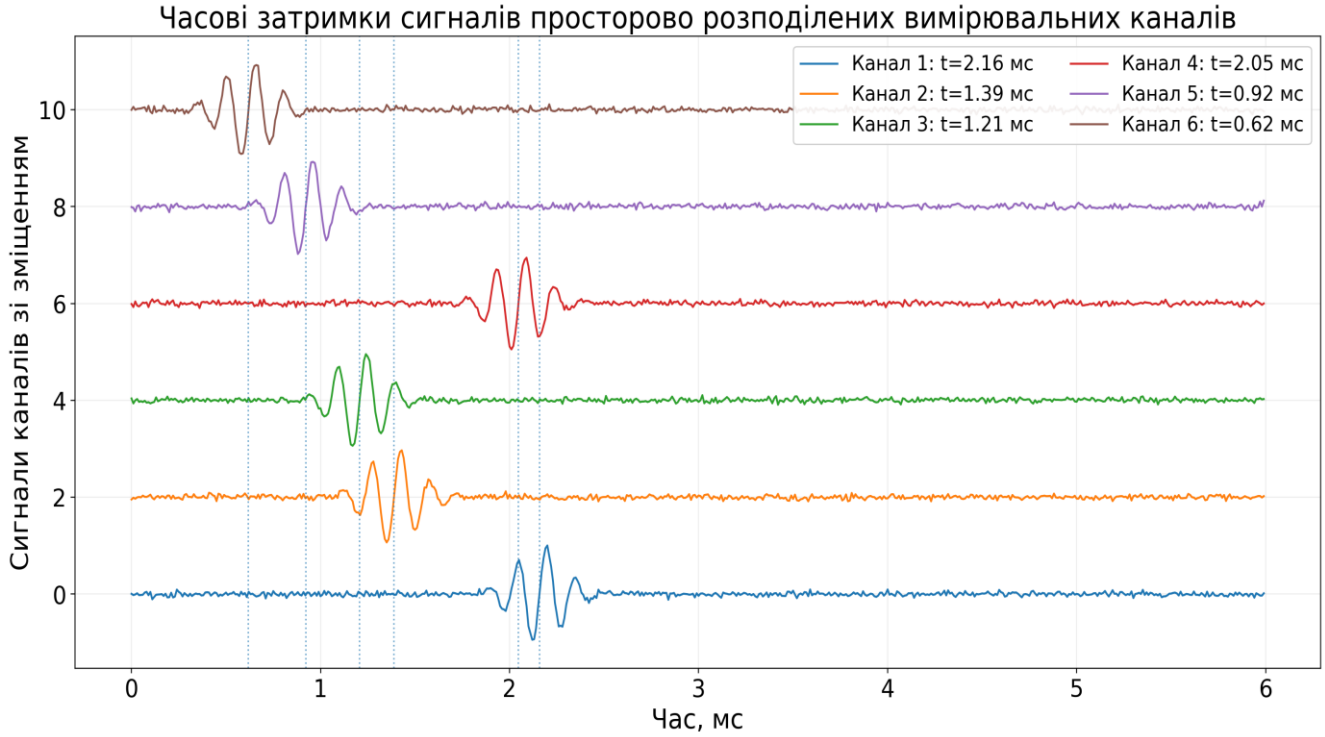


Рисунок 1 – Сигнали просторово розподілених вимірювальних каналів при одному механічному збуренні

На рис. 1 показано сигнали шести каналів. Для зручності їх зміщено один відносно одного по вертикалі. У базовому експерименті джерело знаходиться в точці з координатами (7,4; 3,6) м. Найраніше сигнал надходить до шостого каналу – приблизно через 0,619 мс. Для інших каналів час

приходу збільшується відповідно до відстані від джерела. Найбільша різниця часу відносно найближчого каналу становить близько 1,54 мс. Отже, навіть для одного збурення система отримує набір різних часових затримок, який можна використати для локалізації.

Для визначення координат контрольована область розбивається на сітку можливих положень джерела. Для кожної точки розраховуються очікувані часові затримки та порівнюються з отриманими вимірювальними даними. Точка, для якої ця різниця найменша, приймається як визначене положення джерела. Такий підхід є наочним для бакалаврського дослідження і не потребує складного математичного апарату. У сучасних роботах також застосовують часові різниці як основні ознаки локалізації, доповнюючи їх оптимізаційними або машинними методами [2, 6].

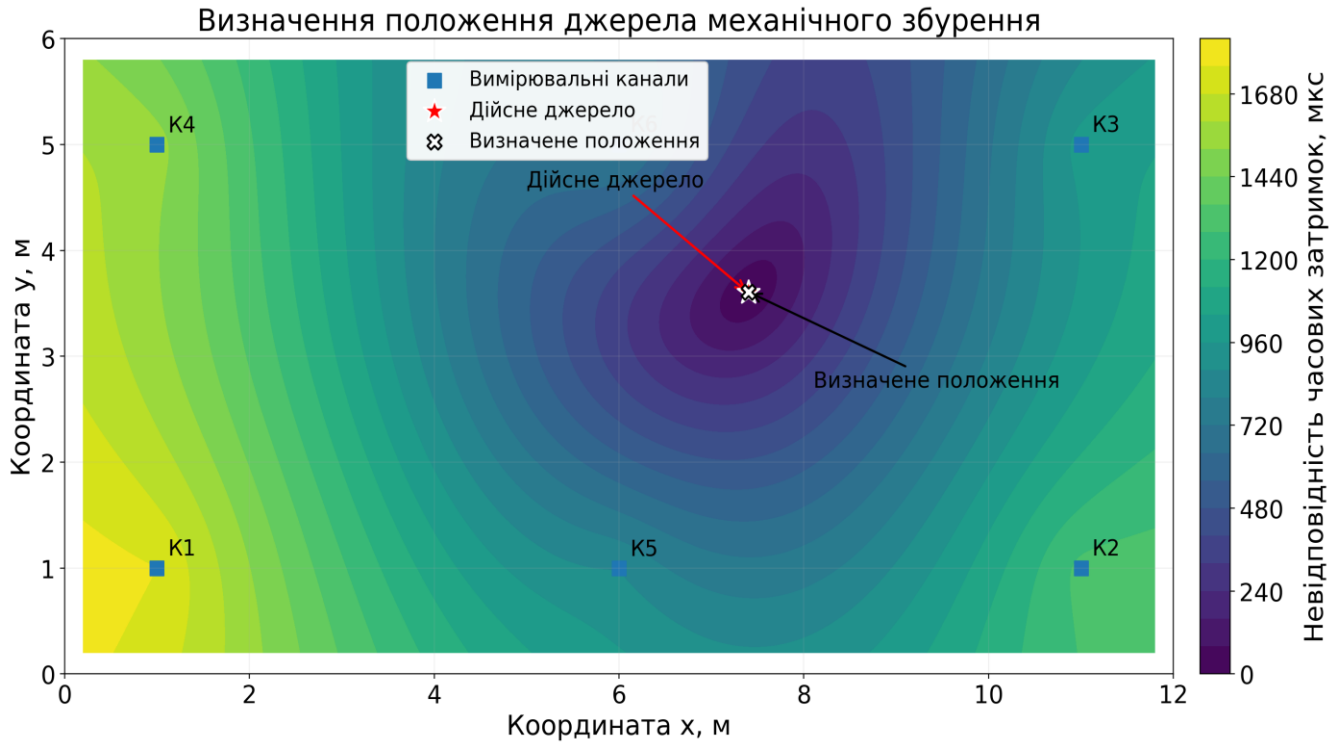


Рисунок 2 – Результат визначення просторового положення джерела механічного збурення

На рис. 2 квадратними маркерами показано положення шести вимірювальних каналів, червоною зіркою – дійсне положення джерела, а світлим маркером – положення, визначене за часовими затримками. Фонове поле характеризує невідповідність між виміряними та розрахованими часовими затримками: чим менше її значення, тим більш імовірним є відповідне положення джерела.

У базовому модельному експерименті дійсні координати становили (7,40; 3,60) м, а визначені – приблизно (7,40; 3,61) м. Похибка локалізації становила близько 0,007 м. Така мала похибка отримана для модельних умов із відомою швидкістю поширення хвилі та невеликою похибкою визначення часу. У реальній конструкції результат погіршується через неоднорідність матеріалу, складні шляхи поширення хвиль, шум і неточність визначення моменту їх надходження. Саме ці фактори розглядаються як важливі джерела невизначеності в сучасних дослідженнях [3-5].

Для дослідження розроблено інтерактивний блокнот Google Colab. У ньому можна змінювати координати джерела, швидкість поширення хвилі, рівень шуму, похибку визначення часу приходу, частоту імпульсу та реалізацію випадкової складової. Після натискання кнопки оновлення автоматично формуються нові сигнали, карта локалізації та числове значення похибки. Це дозволяє безпосередньо дослідити, за яких умов розподілена система визначає координати надійно, а за яких точність знижується.

Висновки. Моделювання показало, що часові затримки сигналів просторово розподілених вимірювальних каналів можуть бути використані для визначення положення джерела механічного збурення. Точність локалізації залежить від геометрії розміщення каналів, швидкості поширення хвилі, рівня шуму та похибки визначення моменту приходу сигналу. Запропонований підхід дозволяє поєднати результати декількох вимірювальних каналів і отримати не лише факт виникнення збурення, а й оцінку його просторових координат.

Література:

1. Raorane S., Ercan T., Papadimitriou C., Packo P., Uhl T. Bayesian optimal sensor placement for acoustic emission source localization with clusters of sensors in isotropic plates. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024. Vol. 214. Art. 111342. DOI: 10.1016/j.ymssp.2024.111342. URL: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2024.111342 (дата звернення: 26.09.2026).

2. Impact Localization System of CFRP Structure Based on EFPI Sensors. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 4. Art. 1091. DOI: 10.3390/s25041091. URL: https://doi.org/10.3390/s25041091 (дата звернення: 26.09.2026).

3. Experimental and Numerical Investigation of Acoustic Emission Source Localization Using an Enhanced Guided Wave Phased Array Method. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 17. Art. 5806. DOI: 10.3390/s24175806. URL: https://doi.org/10.3390/s24175806 (дата звернення: 26.09.2026).

4. Multiple methods for acoustic emission source location in metal waveguides. *Measurement*. 2024. Vol. 229. Art. 114444. DOI: 10.1016/j.measurement.2024.114444. URL: https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114444 (дата звернення: 29.09.2026).

5. Reliable arrival time picking of acoustic emission using ensemble machine learning models. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2024. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0888327024003406 (дата звернення: 26.09.2026).

6. Huang X., Xu R., Yu W., Wu S. Impact Localization in Complex Cylindrical Shell Structures Based on the Time-Reversal Virtual Focusing Triangulation Method. *Sensors*. 2024. Vol. 24, No. 16. Art. 5185. DOI: 10.3390/s24165185. URL: https://doi.org/10.3390/s24165185 (дата звернення: 26.09.2026).

***Осмолович Євгеній**, студент гр. ММ-61-25*
*Науковий керівник: доц. **Коваль А. О.***
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

МЕТОД АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ РЕЖИМАМИ ЗБОРУ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ДАНИХ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

У сучасних інформаційно-вимірювальних системах стає все більше каналів, а частота дискретизації зростає. Через це швидко збільшується обсяг даних. Зростає навантаження на канали зв'язку, пам'ять і обчислювальні засоби. Найпростіше збирати дані з фіксованою частотою. Але такий спосіб не враховує, скільки корисної інформації несе сигнал у конкретний момент. Коли сигнал змінюється повільно, багато відліків виявляються зайвими. А під час швидких перехідних процесів заданої частоти може не вистачити. Тому варто керувати збором адаптивно: частота збору має сама змінюватися залежно від того, як швидко змінюється вимірюваний процес.

Сучасні дослідження підтверджують, що такий підхід має сенс. В одній із робіт частоту дискретизації вибирають за допомогою глибокого навчання з підкріпленням. Алгоритм шукає баланс між якістю даних, енергоспоживанням і кількістю зайвих відліків [1]. Для бездротових вузлів запропоновано методи, які враховують і важливість інформації, і жорсткі обмеження за енергією [2]. Ще один напрям – подійно-кероване вимірювання. У ньому дані передаються лише тоді, коли це справді потрібно, і канали можуть працювати з різною частотою [3].

Мета роботи – розробити та дослідити метод адаптивного керування збором вимірювальних даних. Метод має сам збільшувати частоту дискретизації там, де сигнал несе багато інформації, і зменшувати її, коли

сигнал змінюється повільно. При цьому втрата точності відтворення сигналу має залишатися контрольованою.

Щоб алгоритм міг приймати рішення, ми ввели показник інформаційної активності. Він враховує, наскільки сильно змінився сигнал, і наскільки помилився короткостроковий прогноз:

$$A(k) = \alpha(|x(k) - x(k-1)| + \lambda|x(k) - \hat{x}(k)|) + (1-\alpha)A(k-1), \quad (1)$$

де $A(k)$ – поточна інформаційна активність;

$x(k)$ – результат вимірювання;

$\hat{x}(k)$ – прогнозоване значення;

α – коефіцієнт адаптації;

λ – коефіцієнт, що задає внесок похибки прогнозу.

Показник згладжується експоненційно. Завдяки цьому алгоритм не реагує на поодинокі шумові викиди.

Поточну частоту збору обчислюємо за такою формулою:

$$f_s(k) = f_{\min} + (f_{\max} - f_{\min})\mathrm{sat}_{[0,1]}\left(\frac{A(k)}{A_{\text{пор}}}\right), \quad (2)$$

де $f_s(k)$ – поточна частота збору;

$f_{\min}$ і $f_{\max}$ – її мінімальне та максимальне значення;

$A_{\text{пор}}$ – поріг інформаційної активності;

$\mathrm{sat}_{[0,1]}(\cdot)$ – функція, яка обмежує аргумент інтервалом від 0 до 1.

Якщо активність мала, частота близька до мінімальної. Якщо активність досягає порога, частота стає максимальною. Між цими крайніми випадками

частота змінюється плавно. Отже, алгоритм без різких перемикань переходить від економного режиму до детального.

Для чисельного експерименту ми сформували нестаціонарний сигнал тривалістю близько 60 с. Він містить повільну складову і три короткі перехідні процеси з коливаннями. Максимальна частота дискретизації становить 20 Гц. До сигналу додано випадковий шум зі стандартним відхиленням 0,22 умовної одиниці. В адаптивному режимі мінімальна частота дорівнює 1 Гц, максимальна – 20 Гц. Поріг активності ми підібрали так, щоб добре було видно компроміс між обсягом даних і точністю відтворення.

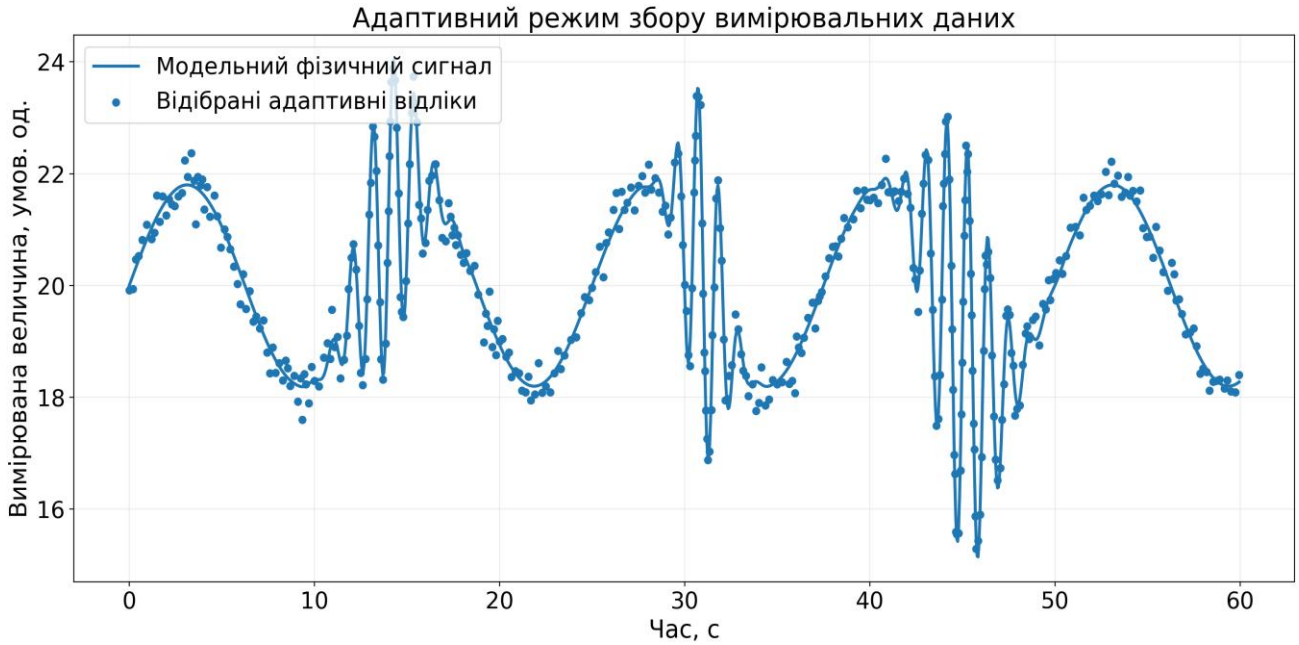


Рисунок 1 – Розподіл адаптивно відібраних відліків у часі

На рис. 1 видно головну особливість методу: відліки розташовані нерівномірно. Там, де сигнал змінюється повільно, алгоритм робить вимірювання рідше. Біля перехідних процесів відліків стає значно більше. У базовому експерименті з 1200 можливих відліків збережено 417. Тобто обсяг

даних зменшився приблизно на 65,3 %. Середньоквадратична похибка (СКП) відновлення сигналу становить близько 0,193 умовної одиниці.

Варто пам’ятати, що менша кількість відліків сама по собі ще не означає кращий результат. Якщо відліків стане занадто мало, можна пропустити короткі події. Тому завдання методу – отримати потрібну точність за мінімально достатнього потоку даних. Такий самий компроміс шукають і сучасні адаптивні методи. У них разом враховують якість даних, енергоспоживання і надлишковість [1], а для автономних вузлів – ще й запас енергії, що залишився [2].



Рисунок 2 – Зміна частоти збору залежно від інформаційної активності процесу

На рис. 2 показано, як реагує алгоритм керування. Коли сигнал спокійний, частота опускається майже до нижньої межі. Коли сигнал починає швидко змінюватися і зростає похибка прогнозу, частота збільшується. Отже, частота дискретизації перестає бути сталим параметром експерименту. Вона стає величиною, якою можна керувати. Схожу ідею використовують у

подійно-керованому оцінюванні: там частота передавання даних змінюється залежно від стану процесу [3], [4].

Порівнювати адаптивний режим із фіксованим треба чесно – за приблизно однакової кількості відліків. У базовому експерименті СКП адаптивного режиму становить 0,193. Для рівномірного розрідження з тією самою кількістю відліків СКП дорівнює приблизно 0,192. Отже, за СКП адаптивний метод у цьому експерименті не виграє. Його перевага в іншому: він розподіляє доступні відліки в часі більш розумно і збирає їх переважно біля динамічних подій. Якщо важливо зберегти фронти сигналу, короткі перехідні процеси або аномалії, це може бути важливішим, ніж мінімальне значення загальної СКП.

У дослідницькій частині роботи ми аналізуємо, як на результат впливають параметри $A_{\text{пор}}$, α, $f_{\min}$ і $f_{\max}$. Якщо зменшити поріг активності, алгоритм стає чутливішим і зберігає більше відліків. Якщо поріг занадто великий, слабкі швидкі зміни можна пропустити. Малий коефіцієнт α робить керування стабільним, але повільним. Великий коефіцієнт прискорює реакцію, але алгоритм починає сильніше реагувати на шум. Тому параметри адаптації треба підбирати з урахуванням спектральних і динамічних властивостей вимірюваного процесу.

Є й важливе обмеження, пов’язане з теоремою дискретизації. Адаптивний алгоритм не скасовує вимоги: щоб помітити високочастотну складову, частота спостереження має бути достатньою. На практиці це означає, що систему краще будувати з двох рівнів. На першому рівні сигнал постійно контролюється з достатньою внутрішньою частотою. На другому рівні адаптивно змінюється частота збереження, передавання або формування повного результату вимірювання. Так система не «проспить» швидку подію, навіть коли працює в економному режимі.

Такий підхід відповідає сучасним рекомендаціям для інтелектуальних платформ Інтернету речей. Рекомендація Міжнародного союзу

електрозв’язку MCE-T L.1341 (2025) прямо передбачає енергоефективний збір даних, спостереження за подіями та адаптивну дискретизацію. Згідно з нею, частота і роздільна здатність мають змінюватися залежно від ситуації та вимог застосування [5]. У документі також наголошено, що попередня обробка даних на місці допомагає менше передавати і зберігати зайвих даних [5].

У складніших мережевих системах адаптивний збір треба поєднувати з урахуванням затримок передавання, шуму і різних базових частот каналів. Zhuang, Wang і Tian запропонували подійно-керований підхід до оцінювання стану для таких систем, який враховує затримки та шум вимірювань [6]. Звідси випливає напрям подальшого розвитку нашого методу: перейти від адаптації одного каналу до узгодженого керування збором даних у багатоканальній інформаційно-вимірювальній системі.

Для досліджень ми розробили інтерактивний блокнот Google Colab. У ньому можна змінювати дев’ять параметрів: мінімальну і максимальну частоти збору, рівень шуму, поріг інформаційної активності, коефіцієнт адаптації, амплітуду, частоту і тривалість динамічних подій, а також реалізацію випадкового процесу. Після кожної зміни автоматично перераховуються кількість збережених відліків, ступінь скорочення даних, середня фактична частота та СКП.

Висновки. Запропоновано метод адаптивного керування збором вимірювальних даних. Він використовує показник інформаційної активності, який враховує зміну сигналу і похибку прогнозу. Модельний експеримент показав, що кількість збережених відліків можна зменшити приблизно на 65 %. При цьому на ділянках зі швидкими змінами сигнал усе одно спостерігається детально. Метод не призначений для того, щоб зменшувати СКП. Його мета – розумно розподіляти обмежену кількість відліків відповідно до того, як змінюється процес. Надалі планується розвивати багатокритеріальне керування, яке враховуватиме похибку, важливість

інформації, енергоспоживання і пропускну здатність каналу. Також планується узгоджено адаптувати частоти різних за природою вимірювальних каналів.

Література:

1. *Context-Aware Adaptive Sampling for Intelligent Data Acquisition Systems Using DQN*. 2025 IEEE 6th International Seminar on Artificial Intelligence, Networking and Information Technology (AINIT). IEEE, 2025. DOI: 10.1109/AINIT65432.2025.11035407. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/11035407/ (дата звернення: 24.09.2026).

2. Arnaiz D., Moll F., Alarcón E., Vilajosana X. Energy and relevance-aware adaptive monitoring method for wireless sensor nodes with hard energy constraints. *Integration*. 2024. Vol. 94. Art. 102097. DOI: 10.1016/j.vlsi.2023.102097. URL: https://doi.org/10.1016/j.vlsi.2023.102097 (дата звернення: 24.09.2026).

3. Xu C., He D., Lv M., Du H. et al. Event-Triggered Distributed Fusion Estimation for Clustered Sensor Networks With Multiscale Fading and Multirate Sampling Characteristics. *IEEE Transactions on Control of Network Systems*. 2025. Vol. 12, No. 3. P. 1943-1956. DOI: 10.1109/TCNS.2025.3566331. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/10981659/ (дата звернення: 24.09.2026).

4. You X., Xiao K., Wang G. A static event-triggered background-impulse Kalman filter for wireless sensor networks with non-Gaussian measurement noise. *Information Fusion*. 2025. Art. 102955. DOI: 10.1016/j.inffus.2025.102955. URL: https://doi.org/10.1016/j.inffus.2025.102955 (дата звернення: 24.09.2026).

5. ITU-T L.1341. *Functional requirements for energy efficiency in intelligent Internet of things platforms*. Geneva : International Telecommunication Union, 2025. URL: https://www.itu.int/rec/T-REC-L.1341 (дата звернення: 24.09.2026).

6. Zhuang X., Wang H., Tian Y. Robust state estimation for networked systems with transmission delays via predictive event-triggered sampling. *Expert*

Systems with Applications. 2026. Vol. 307. Art. 130942. DOI: 10.1016/j.eswa.2025.130942. URL: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.130942 (дата звернення: 24.09.2026).

***Рудаков С. В.**, кандидат технічних наук, доцент,*
доцент кафедри державного нагляду
у сфері пожежної та техногенної безпеки, НУЦЗ України
***Грицюк Д. Б.**, здобувач вищої освіти НУЦЗ України*

МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ЯК ОСНОВА ЗНИЖЕННЯ ТЕХНОГЕННО-ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ

Актуальність проблеми забезпечення безпеки життєдіяльності (БЖД) у сучасних умовах зумовлена зростанням техногенного навантаження на довкілля, ускладненням виробничих процесів та збільшенням кількості потенційних загроз антропогенного та природного характеру. Ефективне управління ризиками, прогнозування небезпек та захист людини неможливі без отримання достовірної, точної та зіставної інформації про параметри довкілля і виробничого середовища. У цьому контексті ключову роль відіграє метрологічне забезпечення, яке гарантує єдність та необхідну точність вимірювань у всіх сферах життєдіяльності суспільства.

Техногенно-екологічні ризики – це ймовірність виникнення негативних наслідків для довкілля, здоров’я та життя людей внаслідок аварій, катастроф або повсякденної діяльності промислових і господарських об'єктів.

Їх зазвичай класифікують за сферами виникнення та характером впливу:

- промислові та аварійні ризики (хімічна небезпека: аварії на хімічних підприємствах, складах чи під час транспортування, що призводять до витоку сильнодіючих отруйних речовин (аміак, хлор, ртуть) та забруднення повітря, ґрунтів і вод; радіаційна небезпека: (інциденти на АЕС, об’єктах ядерно-

паливного циклу або сховищах радіоактивних відходів (забруднення радіонуклідами, підвищення радіаційного фону)); пожежо- та вибухонебезпечність: (аварії на нафто- та газопроводах, НПЗ, складах пально-мастильних матеріалів, що супроводжуються масштабними пожежами, викидами токсичних продуктів горіння та руйнуванням інфраструктури.

- забруднення компонентів довкілля: (атмосферні ризики: викиди парникових газів, важких металів, діоксиду сірки, оксидів азоту та дрібнодисперсного пилу, металургійних комбінатів та транспорту; гідросферні ризики: скидання неочищених промислових та комунальних стічних вод у водойми, забруднення підземних вод нафтопродуктами, пестицидами чи важкими металами; педосферні (ґрунтові) ризики: забруднення сільськогосподарських земель токсичними хімікатами, важкими металами, закислення або засолення ґрунтів через порушення технологій виробництва;

- інфраструктурні та комунальні ризики: гідротехнічні аварії: прориви гребель, дамб чи водосховищ, що спричиняють затоплення великих територій (гідродинамічна хвиля, затоплення промислових та житлових зон); відходи та сміттєзвалища (накопичення промислових відходів (хвостосховища, терикони) та несанкціоновані сміттєзвалища, які отруюють ґрунтові води та стають джерелом пожеж і фільтрату); знос інфраструктури (аварії в мережах водопостачання, каналізації, теплопостачання через фізичне зношення обладнання, що призводить до локальних екологічних та санітарно-епідеміологічних криз);

- військово-техногенні ризики (актуальні для України): пошкодження критичної інфраструктури, руйнування очисних споруд, дамб (як приклад – катастрофа на Каховській ГЕС), промислових гігантів, мінування та забруднення вибухонебезпечними предметами; вторинні екологічні наслідки

(масштабні лісові пожежі внаслідок обстрілів, забруднення ґрунтів залишками ракетного палива та важкими металами від вибухів).

Роль метрології у запобіганні та управлінні техногенно-екологічними ризиками є критичною, оскільки вона забезпечує основу для прийняття будь-яких рішень у сфері безпеки. Для промислових, радіаційних та хімічних ризиків (раннє виявлення та контроль) відбуваються вимірювання концентрацій токсичних речовин: на хімічних заводах або складах метрологічно перевірені газоаналізатори та датчики витоку є першою лінією оборони. Точність цих приладів гарантує, що сигнал про перевищення гранично допустимих концентрацій (ГДК) аміаку чи хлору надійде вчасно, а не тоді, коли хмара піде на місто; при радіаційному моніторингу використовують дозиметри та спектрометри на АЕС і прилеглих територіях, які вимагають регулярного калібрування за державними еталонами. Похибка в радіаційних вимірюваннях може призвести або до приховування реальної загрози, або до необґрунтованої паніки та евакуації; на нафтогазопроводах, реакторах та котлах під високим тиском метрологічні вимоги запобігають катастрофічним вибухам і розгерметизації.

Для хронічного забруднення довкілля (моніторинг та доказова база) використовується екологічний моніторинг повітря і вод: пости спостереження за якістю повітря повинні давати абсолютно точні дані. За цими даними екологи та держава вводять обмеження для підприємств, накладають штрафи чи оголошують екологічні тривоги.

Для інфраструктурних і гідротехнічних ризиків (прогнозування та стійкість) використовується геодезичний та деформаційний контроль: дамби, греблі, мости, висотні будівлі перебувають під постійним наглядом спеціальних вимірювальних систем (інклінометрів, нівелірів, датчиків напруги). Метрологічне забезпечення гарантує виявлення мікрозсувів чи деформацій ґрунту задовго до того, як конструкція почне руйнуватися. Контроль рівня води у водосховищах під час повеней дозволяє заздалегідь

спрогнозувати масштаб потенційного затоплення та вчасно сповістити служби цивільного захисту.

У контексті військово-техногенних загроз відбувається оцінка масштабів руйнувань і забруднень: після ударів по критичній інфраструктурі чи промислових об'єктах рятувальники й екологи використовують прилади радіаційної, хімічної та бактеріологічної розвідки. Достовірність їхніх показників визначає, чи безпечно повертатися людям на деокуповані або постраждалі території. Метрологія охоплює й точність приладів пошуку вибухонебезпечних предметів (міношукачів, магнітометрів), де похибка приладу коштує людського життя.

Безпека життєдіяльності базується на принципах превентивного контролю. Вимірювання фізичних, хімічних, біологічних та психофізіологічних факторів (рівні шуму, вібрації, електромагнітних випромінювань, концентрація шкідливих речовин у повітрі робочої зони та атмосфері) є основою для визначення ступеня ризику для життя і здоров'я людини. Будь-яка похибка у вимірюваннях може призвести до хибних управлінських рішень, недооцінки небезпеки або, навпаки, до зайвих економічних витрат.

Завдання метрологічного забезпечення в охороні праці та цивільному захисті:

- створення та вдосконалення державних еталонів одиниць величин, що застосовуються для оцінки факторів небезпеки;

- забезпечення єдності вимірювань за допомогою регламентованих процедур повірки, калібрування та оцінки відповідності засобів вимірювальної техніки (ЗВТ);

- гармонізація вітчизняної нормативно-правової бази та стандартів у сфері метрології з міжнародними вимогами (ISO, IEC).

Засоби вимірювальної техніки, що використовуються аварійно-рятувальними службами, системами моніторингу надзвичайних

ситуацій та на потенційно небезпечних об'єктах, функціонують у несприятливих умовах (екстремальні температури, агресивне середовище, високі динамічні навантаження). Це вимагає розробки спеціальних методів метрологічного контролю та підвищення стійкості приладів до зовнішніх впливів.

Сучасний етап характеризується переходом до цифрових технологій у метрології. Інтеграція інтелектуальних датчиків, автоматизованих систем моніторингу довкілля в реальному часі та безперервного дистанційного контролю вимагає нових підходів до метрологічної простежуваності та захисту вимірювальної інформації від спотворень.

Таким чином, метрологічне забезпечення безпеки життєдіяльності є фундаментальною складовою національної безпеки, охорони праці та екологічної безпеки держави. Висока точність, достовірність і стандартизація вимірювальних процедур дозволяють мінімізувати наслідки техногенних катастроф, запобігати професійним захворюванням та створювати безпечні умови для життя і праці людини. Подальші дослідження мають бути спрямовані на цифровізацію метрологічних процесів та розробку нових методів контролю небезпечних факторів у реальному часі.

Студент гр. ММ-21-25 ***Сафарян Валерій***
Науковий керівник: к.т.н., доц. ***Коваль А. О.***
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ НА ВІДНОВЛЕННЯ ПРОСТОРОВОГО ПОЛЯ ФІЗИЧНОЇ ВЕЛИЧИНИ

Коли потрібно дізнатися, як розподілена температура, тиск чи деформація вздовж протяжного об’єкта, ми маємо лише значення в тих

точках, де стоять датчики. Усе, що між ними, доводиться відновлювати розрахунком. Зазвичай при цьому мовчки вважають, що всі канали однаково точні. Але в реальній системі так буває рідко: поруч працюють датчики різних типів, класів точності, з різною датою останнього калібрування і різним дрейфом. Тобто канали метрологічно неоднорідні. Постає цілком практичне питання: як ця неоднорідність впливає на відновлене поле і чи можна її врахувати?

Відновлення поля за розрідженими датчиками активно досліджують, зокрема для теплових задач, де від розміщення датчиків і методу відновлення прямо залежить точність результату [1]. Одним із найбільш обґрунтованих методів відновлення є кригінг, або гаусова регресія: він не просто проводить криву через точки, а й враховує статистичну структуру поля та похибки вимірювань [2, 3]. Водночас з погляду метрології кожен результат вимірювання має супроводжуватися оцінкою невизначеності [4]. Тож логічно перевірити, що дасть, якщо ці індивідуальні невизначеності каналів передати безпосередньо в алгоритм відновлення.

Мета роботи – дослідити, як метрологічна неоднорідність вимірювальних каналів впливає на точність і достовірність відновлення просторового поля фізичної величини, та оцінити ефект від урахування індивідуальних невизначеностей каналів під час відновлення.

Для кожного каналу ми оцінюємо сумарну стандартну невизначеність, об’єднуючи випадкову та систематичну складові відповідно до настанови з вираження невизначеності [4]:

$$u_i = \sqrt{\frac{{s_i}^2}{n} + {u_{c,i}}^2}, \qquad (1)$$

де u_i – сумарна стандартна невизначеність i-го каналу, °C;

s_i – стандартне відхилення окремого відліку, °C;

n – кількість усереднених відліків;

$u_{c,i}$ – стандартна невизначеність систематичної складової, що залишилася після калібрування, °C.

Неоднорідність каналів описуємо коефіцієнтом неоднорідності $K_н$ – відношенням невизначеності найгіршого каналу до невизначеності найкращого. Якщо $K_н = 1$, усі канали однаково точні.

Поле між датчиками відновлюємо методом кригінгу. Невизначеності каналів входять у розрахунок через діагональну матрицю:

$$\hat{f}(x) = \bar{f} + \boldsymbol{c}^T(x)(\mathbf{C} + \mathbf{U})^{-1}(\boldsymbol{y} - \bar{f}\mathbf{1}), \qquad (2)$$

де $\hat{f}(x)$ – відновлене значення поля в точці з координатою x;

$\bar{f}$ – середнє значення поля, °C;

$\boldsymbol{c}(x)$ – вектор коваріацій між значенням поля в точці x та в точках розміщення каналів, його елементи $c_i(x) = {\sigma_f}^2 \exp\left(-\frac{(x-x_i)^2}{2\ell^2}\right)$;

σ_f – стандартне відхилення поля, °C;

ℓ – довжина кореляції поля, м;

x_i – координата i-го каналу, м;

$\mathbf{C}$ – матриця коваріацій поля між точками каналів;

$\mathbf{U}$ – діагональна матриця, на діагоналі якої стоять квадрати невизначеностей каналів u_i;

$\boldsymbol{y}$ – вектор результатів вимірювання;

$\mathbf{1}$ – вектор з одиниць.

Та сама модель дає і стандартну невизначеність відновленого значення в кожній точці. Суть проста: канал із більшою невизначеністю отримує меншу вагу, а там, де датчики точні, відновлене поле «довіряє» їм більше. Якщо ж неоднорідність не враховувати, замість U підставляють однакову для всіх каналів невизначеність.

Для перевірки ми змоделювали 13 каналів, розміщених через кожні 5 м на ділянці від 0 м до 60 м. Температурне поле – випадкове й плавне, із середнім значенням 50 °C, стандартним відхиленням 5 °C і довжиною кореляції 12 м. Щоб порівняння було чесним, середньоквадратичне значення невизначеностей усіх каналів ми щоразу залишали однаковим – 0,6 °C, а змінювали лише те, наскільки вони різняться між собою: коефіцієнт неоднорідності від 1 до 20. Поле відновлювали трьома способами: лінійною інтерполяцією, кригінгом без урахування неоднорідності та кригінгом з урахуванням індивідуальних невизначеностей за формулою (2). Для кожного значення коефіцієнта неоднорідності експеримент повторювали 500 разів.

На рис. 1 наведено один характерний приклад для коефіцієнта неоднорідності 8: невизначеності каналів тут змінюються від 0,15 °C до 1,18 °C. Найгірший канал стоїть на координаті 15 м, і його результат помітно «відскочив» від дійсного значення. Лінійна інтерполяція проходить точно через цю точку й переносить похибку на всю сусідню ділянку. Кригінг без урахування неоднорідності згладжує ситуацію, але однаково тягнеться до хибного значення. А кригінг з урахуванням неоднорідності фактично «розуміє», що цьому каналу варто менше довіряти, і спирається на точніших сусідів. У цьому прикладі середньоквадратична похибка відновлення становить 0,54 °C для інтерполяції, 0,42 °C для кригінгу без урахування неоднорідності і лише 0,27 °C – з урахуванням. Найбільша похибка – відповідно 1,47; 0,93 і 0,54 °C.

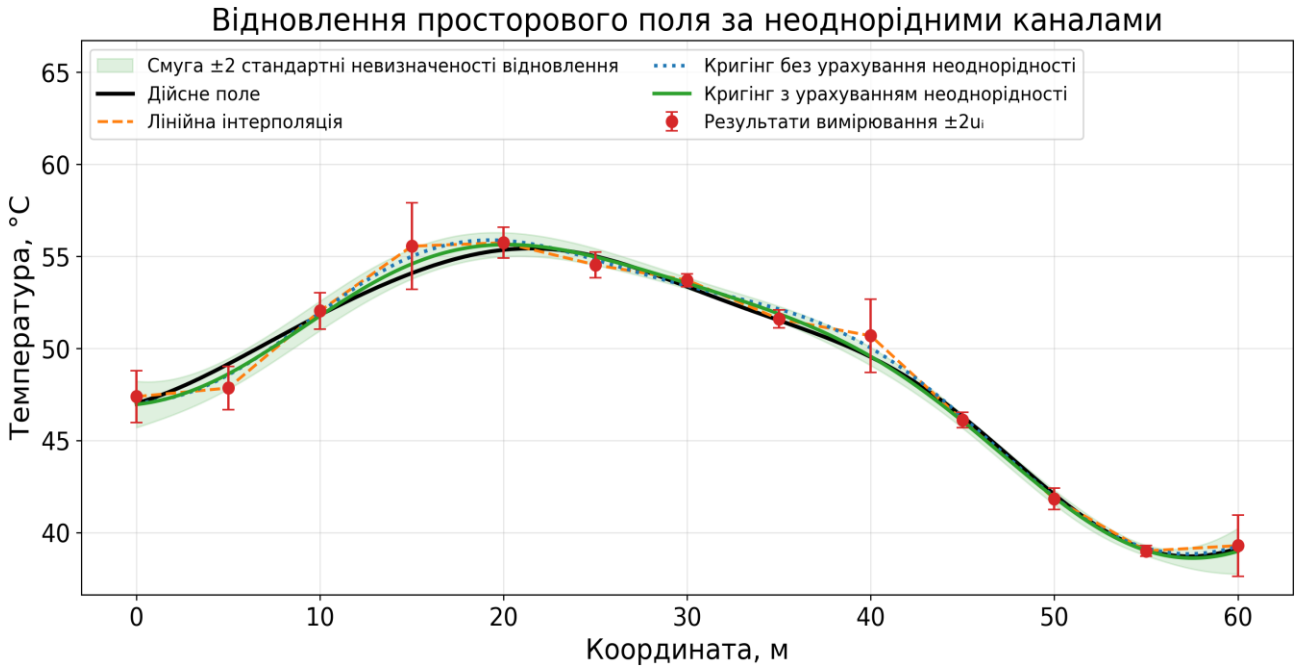


Рисунок 1 – Відновлення просторового поля температури за метрологічно неоднорідними каналами (коефіцієнт неоднорідності 8)

Результати повторних експериментів наведено на рис. 2. Найцікавіше видно на лівому графіку.

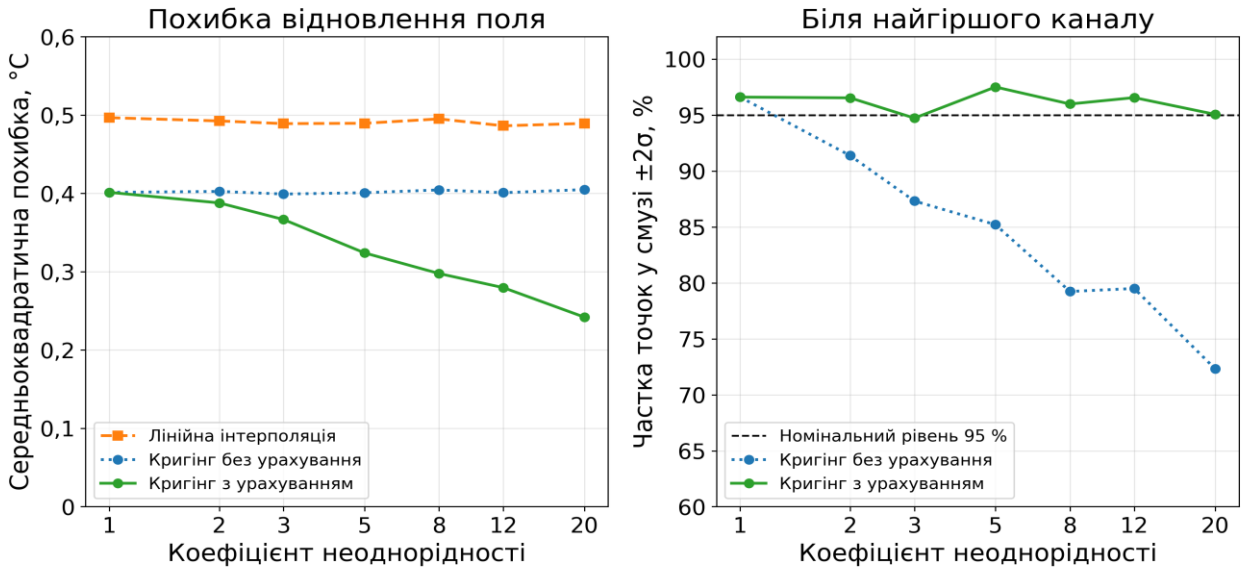


Рисунок 2 – Залежність похибки відновлення поля та достовірності оцінки невизначеності від коефіцієнта неоднорідності каналів

Для лінійної інтерполяції та кригінгу без урахування неоднорідності середня похибка майже не залежить від коефіцієнта неоднорідності: близько 0,49 °C і 0,40 °C. А от кригінг з урахуванням неоднорідності зі зростанням цього коефіцієнта працює дедалі краще: похибка зменшується з 0,40 °C за однакових каналів до 0,30 °C за коефіцієнта 8 і до 0,24 °C за коефіцієнта 20. Пояснення просте: за тієї самої середньої якості каналів неоднорідність означає, що серед них є особливо точні, і правильний алгоритм цим користується. Отже, сама собою неоднорідність не шкодить – шкодить її ігнорування.

Проте середня похибка – ще не вся картина. Біля найгіршого каналу похибка лінійної інтерполяції зростає з 0,45 °C за однакових каналів до 1,02 °C за коефіцієнта неоднорідності 20, а кригінгу без урахування – з 0,40 °C до 0,64 °C. Кригінг з урахуванням неоднорідності тримає її на рівні від 0,34 °C до 0,40 °C. Ще важливіше, що відбувається з оцінкою невизначеності (рис. 2, праворуч). Якщо метод чесно оцінює невизначеність, то приблизно 95 % точок мають потрапляти в смугу ±2 стандартні невизначеності. Для кригінгу з урахуванням неоднорідності так і є: від 95 % до 98 % за будь-якого коефіцієнта неоднорідності. А для кригінгу без урахування ця частка біля найгіршого каналу падає до 79 % за коефіцієнта 8 і до 72 % за коефіцієнта 20. Тобто метод заявляє меншу невизначеність, ніж є насправді, саме там, де результат найменш надійний. Біля найточнішого каналу ситуація протилежна: частка зростає до 99 %, тобто невизначеність там завищена. З погляду метрології це небезпечніше за просто трохи більшу похибку, адже користувач отримує хибне уявлення про достовірність результату.

Усі розрахунки ми виконали в інтерактивному блокноті Google Colab, розробленому для цієї роботи. Звісно, результати отримано на модельних даних, і в них є важливе припущення: невизначеності каналів відомі. На практиці їх беруть із результатів калібрування, технічної документації або

оцінюють за історією вимірювань, і вони самі можуть бути неточними. Крім того, ми вважали похибки різних каналів незалежними. Якщо канали калібрували за одним еталоном, їхні систематичні похибки можуть бути корельованими, і матриця $\mathbf{U}$ вже не буде діагональною. Ще одне природне продовження – задача розміщення: якщо відомо, що деякі канали грубіші, їх варто ставити там, де поле змінюється повільніше, а точні – в найбільш критичних місцях [5].

Висновки. Модельне дослідження показало, що метрологічна неоднорідність вимірювальних каналів сама по собі не погіршує відновлення просторового поля, якщо її врахувати. Кригінг з урахуванням індивідуальних невизначеностей каналів за тієї самої середньої якості каналів зменшив похибку відновлення з 0,40 °C до 0,30 °C за коефіцієнта неоднорідності 8 і до 0,24 °C за коефіцієнта 20. Якщо ж неоднорідність ігнорувати, середня похибка не змінюється, але зростає похибка біля найгірших каналів, а оцінка невизначеності стає недостовірною: замість 95 % у смугу ±2 стандартні невизначеності потрапляє лише від 72 % до 79 % точок. Надалі ми плануємо дослідити, як на результат впливає неточне знання невизначеностей каналів і кореляція їхніх систематичних похибок, а також використати ці результати для обґрунтування розміщення каналів різної точності.

Література:

1. Yuan Q., Yao P., Zhao W., Zhang B. Optimization of Sparse Sensor Layouts and Data-Driven Reconstruction Methods for Steady-State and Transient Thermal Field Inverse Problems. *Sensors*. 2025. Vol. 25, No. 16. Art. 4984. DOI: 10.3390/s25164984. URL: https://doi.org/10.3390/s25164984 (дата звернення: 25.09.2026).

2. Rasmussen C. E., Williams C. K. I. *Gaussian Processes for Machine Learning*. Cambridge, MA : MIT Press, 2006. URL: https://gaussianprocess.org/gpml/ (дата звернення: 25.09.2026).

3. Cressie N. A. C. *Statistics for Spatial Data*. Rev. ed. New York : John

Wiley & Sons, 1993.

4. JCGM 100:2008. *Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement*. Sèvres : BIPM, 2008. URL: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf (дата звернення: 25.09.2026).

5. Krause A., Singh A., Guestrin C. Near-Optimal Sensor Placements in Gaussian Processes: Theory, Efficient Algorithms and Empirical Studies. *Journal of Machine Learning Research*. 2008. Vol. 9. P. 235-284. URL: https://jmlr.org/papers/v9/krause08a.html (дата звернення: 25.09.2026).

Студент гр. ММ-41-23 ***Сафарян Карен***

Науковий керівник: к.т.н., доц. ***Коваль А. О.***

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

МЕТОД ВИЯВЛЕННЯ ЛОКАЛЬНИХ ЗОН ЗМІНИ МЕХАНІЧНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ЗА ДАНИМИ ПРОСТОРОВО РОЗПОДІЛЕНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ

На протяжних конструкціях – балках, прольотах, рамах, естакадах – механічне навантаження контролюють одразу в багатьох точках, наприклад тензометричними датчиками деформації. Здавалося б, завдання просте: встановити поріг для кожного каналу і чекати, поки якийсь канал його перетне. Але на практиці навантаження постійно змінюється зі звичайних робочих причин: змінюється режим, вантаж, температура. Такі зміни зачіпають усю конструкцію одразу, і на їхньому тлі легко не помітити головного – того, що в якійсь невеликій зоні навантаження змінилося не так, як усюди. А саме локальні зміни найчастіше свідчать про перерозподіл зусиль, послаблення опори чи зародження пошкодження.

Ця проблема добре відома: вплив змінних робочих і зовнішніх умов вважають однією з головних перешкод для надійного моніторингу стану конструкцій [1]. Один зі способів її подолати – розглядати не окремі канали, а мережу датчиків як єдине ціле. Якщо показання сусідніх датчиків пов'язані між собою, кожен канал можна передбачити за його сусідами, а відхилення від такого прогнозу вказує на локальну подію [2]. Раніше ми вже досліджували, як із відстанню між каналами слабшає кореляція показань у розподіленій системі. Тепер спробуємо використати цей зв'язок на практиці – для пошуку локальних зон зміни навантаження.

Мета роботи – розробити та дослідити метод виявлення локальних зон зміни механічного навантаження, який не реагує на загальні зміни навантаження всієї конструкції і дозволяє визначити, де саме відбулася локальна зміна.

Ідея методу проста: порівнювати кожен канал не з порогом, а з його сусідами. Якщо навантаження зросло по всій конструкції, сусіди «підтвердять» зміну, і нічого підозрілого не буде. Якщо ж зміна локальна, канал почне помітно відрізнятися від того, що про нього «кажуть» сусіди. Тому спочатку для кожного каналу обчислюємо залишок – різницю між виміряним значенням і прогнозом за сусідніми каналами:

$$e_i(t) = \varepsilon_i(t) - \sum_{j \in N_i} w_{ij}\varepsilon_j(t), \quad w_{ij} = \frac{\exp\left(-\frac{|x_i - x_j|}{L}\right)}{\sum_{m \in N_i} \exp\left(-\frac{|x_i - x_m|}{L}\right)} \qquad (1)$$

де $e_i(t)$ – залишок i-го каналу, мкм/м;

$\varepsilon_i(t)$ – виміряна відносна деформація в i-му каналі, мкм/м;

$\varepsilon_j(t)$ – відносна деформація в сусідньому j-му каналі, мкм/м;

N_i – множина сусідніх каналів (у нашій моделі це канали, розташовані не

далі ніж за 10 м);

w_{ij} – ваговий коефіцієнт сусіднього каналу;

x_i, x_j – координати каналів, м;

L – відстань, яка визначає, наскільки швидко зменшується вага сусіда, м (ми взяли 20 м).

Сума вагових коефіцієнтів дорівнює одиниці. Тому, якщо навантаження однаково зросло в усіх каналах, прогноз зросте на стільки ж, і залишок не зміниться.

Сам залишок ще коливається через шум і дрібні нерівномірності навантаження. Щоб прийняти рішення, ми усереднюємо його на короткому ковзному вікні та нормуємо за даними еталонного запису нормальної роботи:

$$z_i(t) = \frac{\frac{1}{M}\sum_{n=0}^{M-1} e_i(t - n\Delta t) - \mu_i}{s_i} \qquad (2)$$

де $z_i(t)$ – показник локальної зміни в i-му каналі (безрозмірний);

M – кількість відліків у вікні усереднення (50 відліків, тобто 5 с за частоти опитування 10 Гц);

Δt – крок дискретизації, с;

μ_i та s_i – середнє значення і стандартне відхилення усередненого залишку, мкм/м, визначені за еталонним 30-хвилинним записом нормальної роботи.

Ми шукаємо зони збільшення навантаження, тому з порогом $z_{\text{пор}}$ = 5 порівнюємо додатні значення показника. Якщо $z_i(t)$ перевищує поріг, вважаємо, що біля i-го каналу навантаження зросло локально.

Для перевірки ми змоделювали 13 каналів, розміщених через кожні 5 м на ділянці від 0 м до 60 м. Середня відносна деформація становить 200 мкм/м. На неї накладаються повільні робочі зміни навантаження, плавні

вздовж конструкції (амплітуда близько 15 мкм/м), і вимірювальний шум зі стандартним відхиленням 1,5 мкм/м. Щоб перевірити метод «на міцність», у запис тривалістю 120 с ми заклали дві події. На 40-й секунді навантаження стрибком зростає на 40 мкм/м по всій конструкції. Це нормальна робоча ситуація, і метод не повинен на неї реагувати. На 75-й секунді з’являється локальна зона: навантаження зростає на 25 мкм/м у зоні шириною кілька метрів із центром на координаті 32 м.

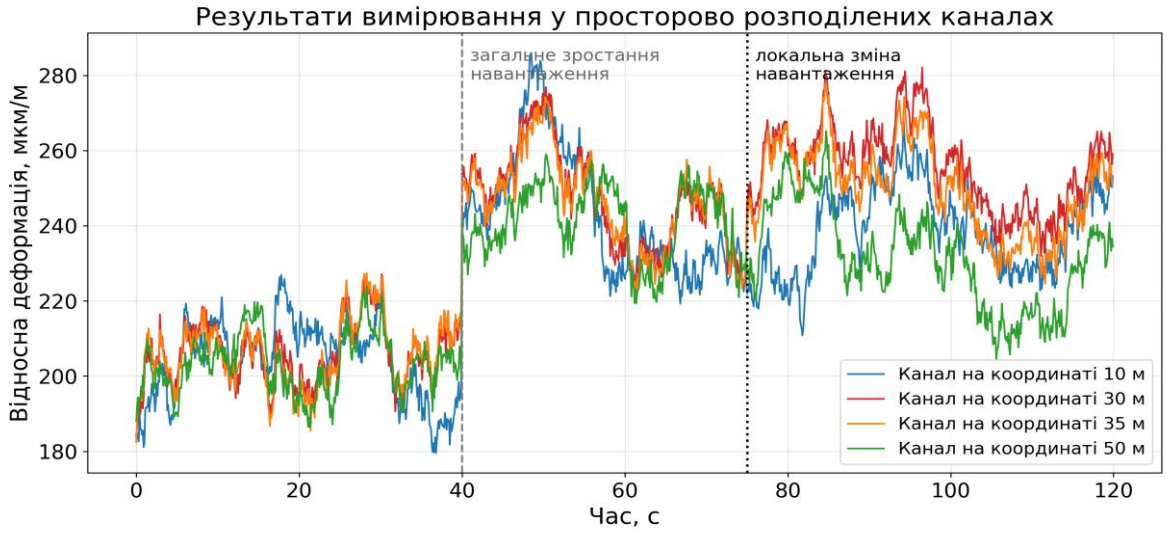


Рисунок 1 – Результати вимірювання відносної деформації у просторово розподілених каналах

Рис. 1 добре показує, чому звичайний пороговий контроль тут не працює. На 40-й секунді всі канали разом «підскакують», а робочі коливання навантаження сягають десятків мкм/м. На цьому тлі локальне зростання після 75-ї секунди в каналах на 30 м і 35 м майже не видно – воно губиться серед загальних змін. Якщо застосувати показник (2) безпосередньо до виміряних сигналів, то вже після загального стрибка поріг перетинають 6 із 13 каналів. Тобто система видає хибні тривоги ще до того, як відбулася хоч якась локальна подія.

Залишки (1) поводяться зовсім інакше. Розкид усередненого залишку для внутрішніх каналів становить лише близько 1 мкм/м, тоді як для самих сигналів – від 12,6 мкм/м до 14,0 мкм/м, тобто приблизно в 13 разів більше. Загальні зміни навантаження просто «віднімаються». Крайні канали на 0 м і 60 м мають сусідів лише з одного боку, тому їхній розкид більший (від 3,6 мкм/м до 3,9 мкм/м), але нормування у формулі (2) це враховує. У результаті між загальним стрибком і локальною подією показник не перетнув поріг у жодному каналі (найбільше значення – 3,1), а за весь 30-хвилинний еталонний запис він жодного разу не перевищив 4,0.

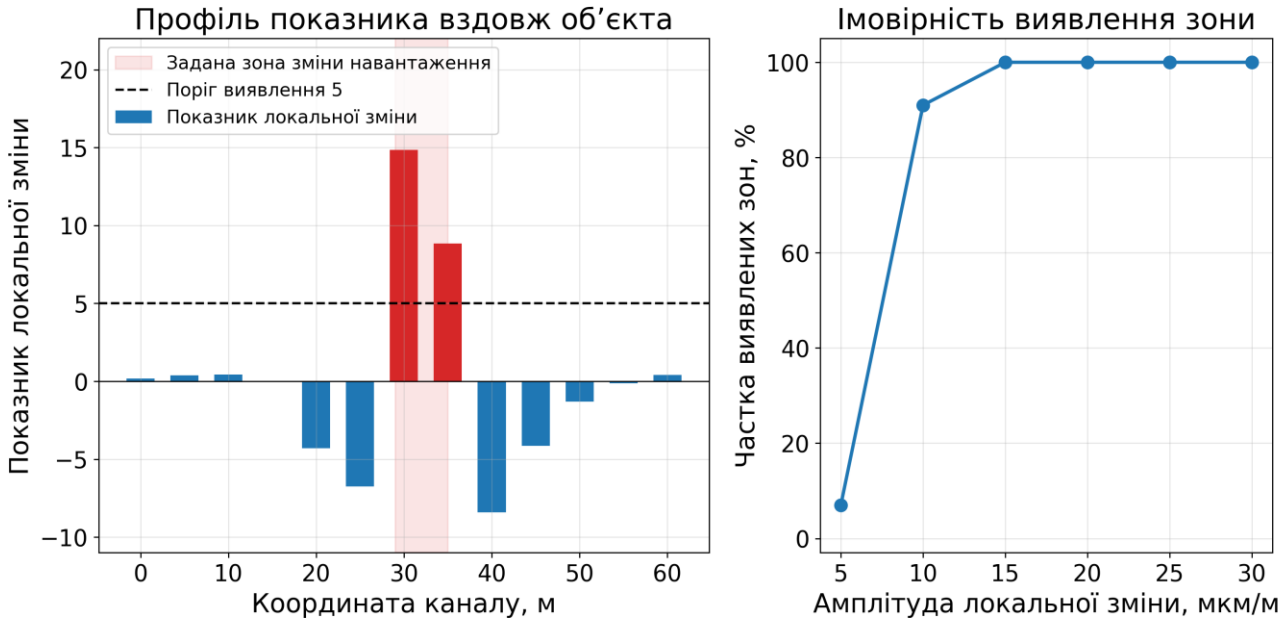


Рисунок 2 – Профіль показника локальної зміни вздовж об'єкта та частка виявлених зон залежно від амплітуди локальної зміни

Профіль показника після локальної події наведено на рис. 2 ліворуч. Поріг перетинають лише два канали: на 30 м (показник 14,9) і на 35 м (8,8). Якщо зважити координати цих каналів за значеннями показника, центр зони виходить на 31,9 м, а задано було 32 м. Спрацювання настає через 1,6 с для каналу на 30 м і через 2,7 с для каналу на 35 м, тобто швидше, ніж триває вікно усереднення. Цікаво, що канали на 25 м і 40 м дають помітні від'ємні

значення (−6,7 і −8,4). Навантаження там не зменшилося: просто до їхнього прогнозу потрапили канали із зони, де навантаження зросло. Така картина – додатний пік у центрі та від’ємні «крила» з боків – типова для локальної зміни. А от якщо поріг перетинає лише один канал, не можна виключити несправність самого датчика [2], і таку ситуацію треба перевіряти окремо.

Щоб переконатися в цьому ми повторили експеримент по 100 разів для кожної амплітуди локальної зміни від 5 мкм/м до 30 мкм/м. Щоразу зону розміщували у випадковому місці між 10 м і 50 м і додавали загальний стрибок навантаження. Результат показано на рис. 2 праворуч. Зміну амплітудою 5 мкм/м, порівнянну з вимірювальним шумом, метод помічає лише у 7 % випадків. Для 10 мкм/м частка виявлених зон зростає до 91 %, а починаючи з 15 мкм/м зону виявлено в усіх випробуваннях. Середня похибка визначення центру зони не перевищила 1,1 м – це значно менше за відстань між каналами. І жодного разу поріг не перетнули канали, віддалені від зони більше ніж на 12 м.

Звісно, метод має обмеження. Він «бачить» лише ті зони, які потрапляють на датчики або поруч із ними. Якщо зона значно вужча за крок розміщення каналів, вона може залишитися непоміченою, тому метод тісно пов’язаний із задачею оптимального розміщення датчиків [4]. Крім того, у нашій моделі навантаження вздовж конструкції змінюється плавно. Для реальних об’єктів із різкими змінами жорсткості прогноз за сусідами доведеться будувати складніше, наприклад із використанням багатовимірного статистичного аналізу відхилень [3]. І нарешті, поріг 5 ми обрали за модельним еталонним записом, а для реальної конструкції його треба визначати за даними її власної нормальної роботи.

Висновки. Запропоновано метод виявлення локальних зон зміни механічного навантаження, у якому кожен вимірювальний канал порівнюється з прогнозом за сусідніми каналами. Такий підхід «гасить» загальні зміни навантаження: у модельному експерименті розкид

усередненого сигналу зменшився приблизно в 13 разів, і після загального стрибка навантаження не було жодного хибного спрацювання, тоді як простий пороговий контроль дав тривогу в 6 із 13 каналів. Локальну зону з амплітудою від 15 мкм/м метод виявляв в усіх випробуваннях, а її центр визначав з похибкою до 1,1 м. Надалі ми плануємо перевірити метод на даних реальної конструкції, дослідити, як на результат впливає крок розміщення датчиків, і навчитися відрізняти локальні зміни навантаження від несправностей окремих датчиків.

Література:

1. Sohn H. Effects of environmental and operational variability on structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*. 2007. Vol. 365, No. 1851. P. 539-560. DOI: 10.1098/rsta.2006.1935. URL: https://doi.org/10.1098/rsta.2006.1935 (дата звернення: 27.09.2026).

2. Kullaa J. Distinguishing between sensor fault, structural damage, and environmental or operational effects in structural health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2011. Vol. 25, No. 8. P. 2976-2989. DOI: 10.1016/j.ymssp.2011.05.017. URL: https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.05.017 (дата звернення: 27.09.2026).

3. Worden K., Manson G., Fieller N. R. J. Damage detection using outlier analysis. *Journal of Sound and Vibration*. 2000. Vol. 229, No. 3. P. 647-667. DOI: 10.1006/jsvi.1999.2514. URL: https://doi.org/10.1006/jsvi.1999.2514 (дата звернення: 27.09.2026).

4. Sun Z., Mahmoodian M., Sidiq A., Jayasinghe S., Shahrivar F., Setunge S. Optimal Sensor Placement for Structural Health Monitoring: A Comprehensive Review. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2025. Vol. 14, No. 2. Art. 22. DOI: 10.3390/jsan14020022. URL: https://doi.org/10.3390/jsan14020022 (дата звернення: 27.09.2026).

Секція 3

Проблемні питання прийняття рішень

***Bugaychuk N. R.**, Postgraduate Student*
***Tychkov V. V.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*
***Halchenko V. Ya.**, Doctor of Technical Sciences, Professor*
***Trembovetska R. V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor*
Department of Instrument Engineering,
Mechatronics, and Computerized Technologies
Cherkasy State Technological University

FEATURES OF NON-CONTACT MEASUREMENT ON A ROLLING MILL: TEMPERATURE, SPEED, VIBRATIONS, AND AXIS DISPLACEMENT

Modern rolling production is characterized by high metal travel speeds, significant temperature gradients, and dynamic loads. Measuring the geometric, thermal, and electrophysical characteristics of hot-rolled products without stopping the technological process is an essential condition for automated quality control. Contact measuring devices under such conditions experience intense wear, and their installation directly near moving metal is complicated by industrial safety requirements.

The aim of this work is to systematize the factors determining errors in non-contact measurements on a rolling mill and to substantiate approaches to compensating for the effects of temperature, speed, vibrations, and radial displacement of the rolled product axis in eddy current testing systems.

The temperature of hot-rolled round bars affects electrical resistivity ρ, conductivity $\sigma = 1/\rho$, magnetic permeability μ, and the distribution of eddy currents. For a limited temperature range, the resistivity dependence is sometimes approximated by the relation $\rho(T) = \rho(T_0)[1 + \alpha(T - T_0)]$, where α is the temperature coefficient of resistance, and T_0 is the reference temperature. For a

wide heating range, especially near phase and magnetic transformations of steel, the linear approximation may be inadequate.

The penetration depth of the electromagnetic field into a conductive material in a simplified model is given by:

$$\delta = [2 / (\omega \mu \sigma)]^{1/2}$$

where $\omega = 2\pi f$ is the angular excitation frequency.

Thus, temperature variation can simultaneously alter the electrical properties of the metal and the sensitivity of the probe to surface and subsurface layers.

To separate thermal and structural contributions, it is advisable to combine non-contact pyrometry with multi-frequency eddy current measurements. Pyrometry requires accounting for surface emissivity, scale, reflected radiation, and viewing conditions. In the absence of an independent temperature channel, signal variations may be erroneously interpreted as changes in electrical conductivity.

The vector of measured characteristics is conveniently represented as:

$$y = F(\sigma, \mu, T, v, e, q, f) + \varepsilon$$

where v is the rolled product travel speed;

e is the eccentricity or axis displacement;

q represents vibration parameters;

f is the excitation frequency; and ε represents total error and noise.

The problem lies in isolating informative variations in electrophysical parameters from the influence of technological interference.

In feed-through eddy current probes, the metal moves relative to the coil. Travel speed can affect measurements due to conductor motion in the electromagnetic field, changes in temporal observation conditions, and interaction with spatial inhomogeneity of the rolled stock. The degree of impact is determined

by sensor geometry, excitation frequency, material properties, and the demodulation algorithm.

Periodic channel sampling is characterized by spatial sampling resolution $\Delta x = v / f$□, where f□ is the sampling frequency. For example, at a speed of 10 m/s and a sampling frequency of 1000 Hz, the distance between adjacent samples is 10 mm. This implies that short local inhomogeneities may be inadequately represented in the measurement data if the sampling frequency is too low.

To minimize errors, it is necessary to synchronize data acquisition with the encoder signal of the rolling mill, control digital filter delay, and utilize timestamps. In the case of acceleration or deceleration of the rolled stock, spatial averaging should be performed over equal intervals of traveled distance rather than fixed time intervals.

Vibrations of rolling stands, guiding devices, and the metal stock itself cause variations in the relative position between the sensor and the inspected object. Even when the electrophysical properties of the steel remain constant, fluctuations in lift-off can modulate the amplitude and phase of the measurement signal.

In a first approximation, the response change due to coordinate fluctuation x is described as:

$$\Delta y \approx (\partial F / \partial x)\, \Delta x$$

Under harmonic motion $x(t) = A \sin(2\pi f_v t + \varphi)$, the signal acquires a periodic component whose frequency is associated with the vibration frequency f_v. Such a component can fall within the passband of the useful signal and complicate filtering.

Practical means of mitigating vibration effects include mechanical decoupling of the probe assembly, increasing mounting rigidity, using accelerometers to record mechanical oscillations, and adaptive digital compensation. At the same time, filtering must not eliminate genuine rapid variations in rolled product properties.

The passband should be aligned with mechanical perturbation frequencies, movement speed, and the characteristic spatial scale of defects. For an inhomogeneity of length L, the characteristic transit frequency is approximately $f_o = v / L$. Selecting the sampling frequency must ensure a sufficient margin relative to the maximum useful signal frequency and account for anti-aliasing filtering.

A encircling eddy current probe is often designed under the assumption of coaxial alignment between the round metal object and the pick-up coil. In the production line, this condition is violated due to bar deflection, guide wear, oscillations, and uneven feeding. Axis displacement alters the electromagnetic field distribution and, consequently, the complex impedance of the coil.

The axis position can be characterized by the vector $e = (e_x, e_y)$, whose magnitude is $|e| = (e_x^2 + e_y^2)^{1/2}$. For a symmetrical probe design at small displacements, a portion of the error may exhibit a quadratic character; however, the actual relationship depends on coil geometry, shielding, and material properties, and should be determined via modeling or calibration.

An effective compensation strategy involves using multiple sections of measuring windings with spatially distributed signals. Differential channel combinations can carry information about the direction and magnitude of displacement, whereas symmetrical combinations reflect material properties. However, parameter separation requires checking system identifiability and sufficient sensitivity.

To investigate the combined influence of technological factors, a numerical electromagnetic field model parameterized by temperature, conductivity, magnetic permeability, excitation frequency, and axis displacement can be applied. The generated results are used to build a high-speed surrogate model suitable for real-time measurement processing.

An example of a local approximation is:

$$\hat{y} = \beta_0 + \beta_1 T + \beta_2 v + \beta_3 e + \beta_4 A + \beta_5 f + \beta_6 Te + \beta_7 vf + \dots$$

where β_i are estimated coefficients and A is the vibration amplitude.

Such a regression serves merely as an illustration: a physically adequate model must account for nonlinearities, factor interactions, variable scaling, and domain boundaries.

Computational experiment planning with uniform coverage of the multidimensional domain, particularly using Sobol sequences, enables training dataset formation without excessive point clustering in narrow regions of the factor space. Models must be validated on independent parameter combinations not used during training.

Complex responses $Z(f_1)$, $Z(f_2)$, …, $Z(f□)$ are recorded at multiple frequencies. The vector of real and imaginary signal components contains distinct information regarding field penetration depth, conductivity, magnetic properties, and geometrical perturbations. The optimal set of frequencies is chosen based on sensitivity to target parameters, channel correlation, and noise immunity.

Total uncertainty in determining an electrophysical parameter can be formed by contributions from calibration, temperature, speed, vibrations, axis displacement, and electronic noise. For independent components, the combined standard uncertainty can be estimated as:

$$u_c = (u^2cal + u^2T + u^2v + u^2q + u^2e + u^2n)^{1/2}$$

If components are correlated, corresponding covariance terms must be added.

For parametric design, it is expedient to define the target function $J = w_1\ RMSE + w_2\ S + w_3\ \tau$, where $RMSE$ is the root mean square error of prediction, S is the sensitivity index to interference, τ is computation time, and w_i are weighting factors. In robust design following Taguchi's approach, technological perturbations are treated as noise factors, whereas probe structural and algorithmic parameters are treated as control parameters.

Performance criteria of the system should include not only accuracy under nominal conditions, but also estimate stability across various temperatures, speeds,

and axis positions, processing latency, and the capability for automatic detection of invalid measurements. Verification should be conducted on both synthetic data and independent experimental series.

Four main groups of factors determining the specifics of non-contact measurement on a rolling mill have been examined: metal temperature, travel speed, technological equipment vibrations, and axis displacement of round rolled stock. It is shown that these factors can affect the eddy current signal through changes in material electrophysical properties as well as through disruptions of geometrical and dynamic measurement conditions.

The expediency of multi-frequency excitation, supplementary temperature and vibration monitoring, data synchronization with rolled stock speed, and multi-channel configurations for axis displacement compensation is substantiated. A promising research direction is combining electromagnetic modeling, surrogate models, and robust parametric design to ensure reliable inspection in the production stream.

References:

1. García-Martín, J., Gómez-Gil, J., & Vázquez-Sánchez, E. (2011). Non-destructive techniques based on eddy current testing. *Sensors*, *11*(3), 2525-2565. https://doi.org/10.3390/s110302525

2. Dodd, C. V., & Deeds, W. E. (1968). Analytical solutions to eddy current probe coil problems. *Journal of applied physics*, *39*(6), 2829-2838. https://doi.org/10.1063/1.1656680

3. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. 10th ed. Wiley, 2019.

4. Halchenko, V., Trembovetska, R., Tychkov, V., & Tychkova, N. (2023). Construction of quasi-DOE on Sobol's sequences with better uniformity 2D projections. *Applied Computer Systems*, *28*(1), 21-34. https://doi.org/10.2478/acss-2023-0003

5. Bugaychuk N., Tychkov V., Halchenko V., Trembovetska R. Robust parametric design of eddy current probes for accurate measurement of magnetic permeability in moving ferromagnetic strips using Taguchi optimization. In: Scientific Research Methodology – 2025, Proc. Ukr. Scien. and Pract. Conf.: Cherkasy, Nov. 2025. – p. 98-99.

6. Бугайчук Н. Р., Тичков В. В., Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В. Підвищення точності вихрострумових вимірювань електрофізичних властивостей металевих виробів на конвеєрних лініях // Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об’єктах : Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, Харків, 4 листопада 2025 р. : матеріали конференції. – Харків : ХНАДУ, 2025. – С. 47-53.

***Korshun Ye. A.**, postgraduate student*
***Tychkov V. V.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*
***Halchenko V. Ya.**, Doctor of Technical Sciences, Professor*
***Trembovetska R. V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor*
Department of Instrument Engineering,
Mechatronics, and Computerized Technologies
Cherkasy State Technological University

MAIN IONIC POLLUTANTS OF WATER RESOURCES AND REGULATORY APPROACHES TO ASSESSING THEIR CONCENTRATIONS

Ensuring the ecological safety of Ukraine's water resources requires systematic monitoring of the chemical composition of surface, ground, and drinking waters. Particular attention is paid to ionic components that characterize natural mineralization, anthropogenic load, and potential risks to public health and

aquatic ecosystems. Ion concentrations vary under the influence of agricultural runoff, municipal and industrial discharges, mining activity, seasonal flow fluctuations, and oxidation-reduction processes.

The objective of this work is to systematize the main ionic pollutants of water resources and substantiate regulatory and methodical approaches to measuring, comparing, and interpreting their concentrations using computer-integrated ionometric control.

The priority anions include nitrate ions NO_3^-, nitrite ions NO_2^-, ammonium in the form of NH_4^+ (cation), chloride ions Cl^-, sulfate ions SO_4^{2-}, and fluoride ions F^-. Nitrates are frequently associated with fertilizer application and domestic wastewater filtration; nitrites may indicate incomplete nitrification or denitrification processes. Ammonium characterizes nitrogen pollution and depends on the acidity and temperature of the medium.

Chlorides and sulfates serve as both natural mineralization components and markers of technogenic impact. Elevated fluoride concentrations may be of geogenic origin or associated with specific technological processes. Calcium Ca^{2+} and magnesium Mg^{2+} determine water hardness, while sodium Na^+ and potassium K^+ influence its ionic balance.

Toxicologically significant cations include Pb^{2+}, Cd^{2+}, Cu^{2+}, Ni^{2+}, and other metals; however, their chemical forms in water may differ from free ions. Therefore, the result of an ion-selective measurement is not always identical to the total element content determined after sample digestion.

Mass concentration is defined by the relation $C□ = m_i / V$, where m_i is the mass of the component, mg; V is the sample volume, dm^3. Molar concentration is calculated as $c_i = C□ / M_i$ using consistent units of measurement, where M_i is the molar mass of the substance. When reporting, it must be clearly specified whether the concentration is presented "as the ion" (NO_3^-) or "as the element" (N), since these values are not numerically identical.

Regulatory assessment depends on the intended use of the water body and the control objective. For drinking water, hygienic safety and quality requirements are applied; for surface waters, ecological criteria for the status of water bodies are used, taking into account the type of water body and established environmental goals; for wastewater discharges, permit conditions and regulations specific to the individual water user apply. Conflating these three assessment systems can lead to erroneous conclusions.

In Ukraine, regulatory management is anchored in the Water Code of Ukraine, the Law of Ukraine "On Drinking Water, Drinking Water Supply and Wastewater Disposal", DSanPiN 2.2.4-171-10 (as amended), as well as acts on state water monitoring. For comparison with international approaches, Directive (EU) 2020/2184 on the quality of water intended for human consumption and the Water Framework Directive 2000/60/EC should be considered. Specific limit values should be taken from the current edition of the regulatory document for the corresponding water category and parameter.

A basic compliance check for a parameter with an established upper limit is carried out according to the condition $C_i \leq Cnorm,_i$. For parameters normalized within an interval, $Cmin,_i \leq C_i \leq Cmax,_i$ is verified. However, a simple inequality check does not account for measurement uncertainty; thus, a predefined decision rule is required for borderline concentrations.

The ratio $K_i = C_i / Cnorm,_i$ can serve as an auxiliary dimensionless indicator of approaching the upper regulatory limit: $K_i < 1$ indicates a concentration below this limit, while $K_i > 1$ indicates a concentration above it. It does not replace the legally established assessment procedure and is not automatically applied to two-sided normalized parameters.

Table 1 – Control Parameters and Interpretation

Component	Typical Source	Assessment Feature
NO_3^-, NO_2^-	Agricultural and domestic runoff	Distinguish nitrogen forms and units
NH_4^+	Organic pollution	Account for pH and temperature
Cl^-, SO_4^{2-}	Mineralization, discharges	Account for natural background
F^-	Geogenic and technogenic sources	Monitoring in drinking water
Pb, Cd, Cu, Ni	Industrial sources	Distinguish free ions from total content

Ion-selective electrodes (ISEs) are promising for operational monitoring of specific ions, converting the activity of the target ion into an electrical potential. Under idealized conditions, the response is described by the Nernst equation:

$$E = E_0 + (RT / zF)\, ln\, a_i$$

where E is the electrode potential;

E_0 is the conditional standard potential;

R is the universal gas constant;

T is absolute temperature; z is the ionic charge with sign;

F is the Faraday constant; and

a_i is the ion activity.

Activity and concentration are related by the relation $a_i = \gamma_i\, c_i / c_0$, where γ_i is the activity coefficient and c_0 is the standard concentration. Thus, without accounting for ionic strength and matrix effects, the electrode potential does not provide an unambiguous determination of analytical concentration.

In real samples, the response depends on interfering ions. To describe selectivity, the modified Nikolsky-Eisenman equation is applied:

$$E = E_0 + (RT / z_iF)\, ln\, [a_i + \Sigma\, K^{pot}_{i}\square\ (a\square^{)(z_i/z\square)}]$$

where $K^{pot}_{i}\square$ is the potentiometric selectivity coefficient.

This relation is used taking into account assumptions regarding valences, matrix, and suitability of the specific electrode.

The metrological procedure must include calibration with standard solutions, checking the slope of the electrode characteristic, monitoring potential drift, temperature compensation, blank and control samples, replicate measurements, and estimation of the limit of quantification (LOQ). For low concentrations and complex matrices, results should be confirmed using reference methods, particularly ion chromatography or atomic spectrometric methods for metals.

Combined standard uncertainty $u_c(C)$ is determined from contributions of calibration, repeatability, temperature, sample preparation, and matrix effects. In the absence of significant correlations, $u_c(C) = (\Sigma u^2(C))^{1/2}$ can be applied. Expanded uncertainty $U = k \cdot u_c(C)$, where k is the coverage factor chosen according to the adopted procedure.

Under a conservative decision rule for an upper limit, a conformity conclusion is made when $C + U \leq Cnorm$; non-conformity is declared when $C - U > Cnorm$. An intermediate zone requires a separate decision according to an agreed rule and regulatory requirements. This rule serves as an example and does not replace mandatory laboratory control procedures.

An automated monitoring system may include a block of ion-selective sensors, a temperature sensor, a pH meter, a signal conditioning module, an analog-to-digital converter, a microcontroller, and software for data processing. Time-stamped data, sampling location coordinates, calibration information, and quality status are transmitted to a local or cloud database.

The processing sequence includes: sample identification; electrode functionality check; registration of potentials and temperature; conversion of activity to concentration; matrix effect correction; uncertainty estimation; comparison with regulatory limits; generation of excursion alerts; and archiving of results. This approach ensures assessment reproducibility and enables retrospective analysis.

To identify spatial-temporal trends, it is advisable to calculate median and seasonal concentration characteristics, analyze missing observations, and distinguish background variations from emergency discharges. Predictive algorithms can serve as an early warning tool, but their outputs should not be equated with the results of accredited laboratory measurements.

Conclusions. The main groups of ionic components that determine the chemical status of water resources have been systematized: nitrogen compounds, halides, sulfates, mineralization cations, and toxicologically significant metals. It is shown that regulatory assessment must account for the intended water use, form of analyte presentation, current edition of the regulatory document, and measurement uncertainty.

The use of ion-selective sensors for operational monitoring is substantiated under conditions of regular calibration, temperature compensation, and selectivity accounting. The computer-integrated approach creates prerequisites for accumulating comparable data, timely detecting changes, and supporting evidence-based decisions in water resource protection in Ukraine.

References:

1. Water Code of Ukraine dated June 6, 1995 No. 213/95-VR (current edition).

2. Law of Ukraine "On Drinking Water, Drinking Water Supply and Wastewater Disposal" dated January 10, 2002 No. 2918-III (current edition).

3. DSanPiN 2.2.4-171-10. Hygienic requirements for drinking water intended for human consumption (as amended).

4. Directive (EU) 2020/2184 of the European Parliament and of the Council on the quality of water intended for human consumption.

5. Directive 2000/60/EC establishing a framework for Community action in the field of water policy.

6. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories.

7. Коршун Є. А., Тичков В. В., Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В. Проектування комп'ютерно-інтегрованих технологій контролю водних ресурсів за допомогою іонселективних сенсорів // Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об'єктах : Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, Харків, 4 листопада 2025 р. : матеріали конференції. – Харків : ХНАДУ, 2025. – С. 58-62.

8. Korshun Y., Tychkov V., Trembovetska R., Halchenko V. Improving the effectiveness of environmental monitoring and protection of water resources. In: Scientific Research Methodology – 2025, Proc. Ukr. Scien. and Pract. Conf.: Cherkasy, Nov. 2025. – p. 89-90.

***Tychkova N. B.**, Senior Lecturer*
Cherkasy Polytechnic Specialist College
***Halchenko V. Ya.**, Doctor of Technical Sciences, Professor*
***Trembovetska R. V.**, Doctor of Technical Sciences, Professor*
***Tychkov V. V.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor*
Department of Instrument Engineering,
Mechatronics, and Computerized Technologies
Cherkasy State Technological University

SURROGATE MODEL OF A PROBE WITH ACCUMULATION OF ADDITIONAL INFORMATION FOR MULTI-FREQUENCY TESTING

Multi-frequency eddy current testing is a promising method for non-destructive determination of electrophysical and geometrical parameters of metallic objects. Unlike single-frequency measurement, using a set of frequencies makes it possible to obtain a combination of responses whose sensitivity to electrical conductivity, magnetic permeability, geometry, and lift-off differs

significantly. At the same time, solving the direct electromagnetic problem for each combination of parameters requires substantial computational resources.

The aim of this work is to substantiate the structure of a surrogate model of an eddy current probe, which is sequentially refined by accumulating additional informative measurements at various excitation frequencies. The proposed approach is considered as a methodical scheme; quantitative accuracy indicators require separate experimental verification.

Let the vector of controlled parameters $\theta = (\sigma, \mu_r, d, h)$ contain the electrical conductivity σ, relative magnetic permeability μ_r, characteristic geometric dimension d, and operational lift-off h. For a set of frequencies $f_1, \ldots, f_m$, the complex output signal of the probe is represented as:

$$Z(f_i, \theta) = R(f_i, \theta) + jX(f_i, \theta), \quad i = 1, \ldots, m \qquad (1)$$

where R and X are the active and reactive components of impedance, respectively; j is the imaginary unit.

The frequency dependence of the eddy current penetration depth for a homogeneous conductive medium in the plane-wave approximation is characterized by the relation:

$$\delta(f) = [\pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma]^{-1/2} \qquad (2)$$

where μ_0 is the magnetic constant (permeability of free space).

Thus, changing the frequency yields responses with different penetration depths and varied parametric sensitivities.

To accelerate the analysis, it is proposed to replace the resource-intensive direct model with an approximation $\hat{Y} = \hat{g}(\theta, f, \beta)$, where β represents the parameters of the surrogate model. Polynomial regression, Gaussian processes, or neural network approximators can serve as the basis. The training dataset is formed

based on the results of a physical or numerical experiment, taking into account the ranges of parameters and frequencies. High uniformity of coverage in the multidimensional space should be ensured using quasi-random experimental designs, particularly Sobol sequences [1].

The principle of accumulating additional information lies in adaptively supplementing the initial dataset D_0 with new observations $D_{+1} = D \cup \{(\theta_{+1}, f_{+1}, Z_{+1})\}$. Selection of the next frequency and measurement mode can be carried out using the criterion of maximum expected informativeness, for example, based on the determinant of the Fisher information matrix:

$$(\theta^*, f^*) = \arg\max \det[J(\theta, f)^T \Sigma^{-1} J(\theta, f)] \qquad (3)$$

where J is the matrix of output signal sensitivities to the estimated parameters;

Σ is the noise covariance matrix.

Correct application of this criterion requires ensuring full rank of the sensitivity matrix and accounting for physical constraints of the frequency range.

Structurally, the procedure is implemented as a closed-loop workflow: generation of the initial experimental design → calculation or measurement of the complex response → training of the surrogate model → evaluation of uncertainty and sensitivity → selection of an additional frequency → dataset expansion → retraining and independent validation. In this scheme, additional frequencies are chosen not arbitrarily, but according to their contribution to distinguishing the object's parameters.

To assess the approximation quality, it is proposed to use the root mean square error (RMSE) and the relative error of the complex response on an independent test set. The stability of the inverse problem $\theta^* = \arg\min_\theta \Sigma_i \|Z_i - \hat{g}(\theta, f_i)\|^2$ under variations in noise, lift-off, and material

properties should be evaluated separately. A reduction in approximation error does not in itself guarantee unambiguous reconstruction of all controlled parameters.

The expected advantage of the proposed approach is a reduction in the number of costly direct problem computations, targeted accumulation of informative data, and the adaptability of multi-frequency testing to a specific class of objects. At the same time, efficiency depends on the adequacy of the physical model, representativeness of the initial sample, and calibration of the measurement channel.

Thus, the concept of a surrogate model for an eddy current probe with adaptive accumulation of additional information in multi-frequency space has been formulated. Further research should focus on numerical and experimental comparison of frequency selection strategies, uncertainty estimation, and verification of parameter reconstruction accuracy.

For a comprehensive representation of the probe signals, it is expedient to use the vector $Y(\theta) = [\mathrm{Re}\ Z(f_1,\theta), \mathrm{Im}\ Z(f_1,\theta), \ldots, \mathrm{Re}\ Z(f_n,\theta), \mathrm{Im}\ Z(f_n,\theta)]^T$. Each frequency component characterizes a distinct interaction between the electromagnetic field and the object. At the same time, increasing the number of frequencies does not guarantee a proportional gain in information: close frequencies may produce highly correlated responses. Therefore, frequency grid construction should be tied to sensitivity assessment, noise characteristics, and physical probe limitations.

In the case of simultaneous estimation of electrical conductivity, magnetic permeability, geometry, and lift-off, a problem of mutual parameter interaction on the measured impedance arises. For example, an increase in lift-off can decrease signal amplitude similarly to a change in conductivity. To mitigate such ambiguity, it is advisable to combine amplitude and phase features across multiple frequencies. Normalizing features relative to a reference measurement reduces signal scaling effects and simplifies surrogate model training.

A normalized complex response $\Delta Z_i = [Z(f_i,\theta) - Z_0(f_i)] / |Z_0(f_i)|$ can be introduced, where $Z_0(f_i)$ is the reference impedance at the corresponding frequency. If $|Z_0|$ is close to zero, normalization must be modified using a physically grounded scaling factor. This approach does not replace calibration, but it provides a consistent representation of experimental data for subsequent modeling.

The initial training set should be formed using a design of experiments (DoE) that uniformly covers the allowable domain of controlled parameters. Quasi-random Sobol sequences are suitable for this purpose; their application to multidimensional experimental planning is discussed in a joint publication [1]. This work substantiates the point placement strategy but does not by itself confirm the experimental efficiency of a specific multi-frequency probe surrogate model.

For each design point, a complex response is calculated via numerical solution of the electromagnetic problem or physical measurement. The choice of approximation method depends on data volume, response nonlinearity, and acceptable computational time. Polynomial regression provides interpretability; radial basis functions offer flexible modeling of smooth dependencies; Gaussian processes additionally yield prediction uncertainty estimates. Models should be compared on the same independent test set.

The loss function for training can be expressed as:

$$L(\beta) = (1/N)\, \Sigma\square\ \Sigma_i\, w_i\, |Z\square(f_i) - \hat{Z}\square(f_i,\beta)|^2 + \lambda\Omega(\beta),$$

where N is the number of training states,

w_i are frequency weighting factors,

$\Omega(\beta)$ is a regularization term, and

λ is its coefficient.

Weights should be chosen taking into account noise variances so that the most noisy frequencies do not dominate optimization. For a complex response, the squared modulus accounts for errors in both impedance components.

The adaptive cycle begins with model training on the initial dataset. Next, regions of high prediction uncertainty or insufficient parametric sensitivity are identified within the domain of allowable states and frequencies. Additional computations or measurements are performed at selected points; new observations are added to the database, after which the model is retrained or updated. The cycle repeats until a specified accuracy criterion is met or the computational budget is exhausted.

To select additional points, a combined criterion:

$$A(\theta,f) = \alpha U(\theta,f) + (1-\alpha)S(\theta,f) \text{ can be used,}$$

where U is the normalized estimate of surrogate prediction uncertainty,

S is the normalized measure of parameter informativeness, and

$\alpha \in [0;1]$ is a weighting coefficient.

Both components must be on the same scale. This harmonizes exploration of poorly studied regions with the selection of frequencies sensitive to controlled properties.

Practical information accumulation requires logging not only impedance values, but also metadata: excitation frequency, temperature, lift-off, calibration state, object type, and error estimation. Without these details, new measurements may introduce systematic bias. To prevent uncontrolled database growth, duplicate points should be checked, and a separate test set not used during adaptive selection should be maintained.

After constructing the surrogate model, the inverse problem can be formulated as $\theta^{\wedge} = \arg\min_{\theta} \Sigma_i |Z_{meas}(f_i) - \hat{Z}(f_i,\theta)|^2 / s_i^2$, where Z_{meas} is the measured complex impedance, and s_i^2 is the noise variance estimate at frequency f_i.

Minimization is carried out considering physical constraints on parameters. To avoid misinterpretation of results, condition number analysis of the sensitivity matrix and potential non-uniqueness of the solution must be considered.

Model quality should be characterized by complex prediction error, reconstruction errors for each physical parameter, and robustness to measurement noise. It is also advisable to evaluate the model on states not included in the training set and investigate how results depend on the number of frequencies. Comparison between single-frequency and multi-frequency modes must be conducted under identical calibration conditions and comparable noise levels.

The adaptation termination criterion can be the simultaneous fulfillment of conditions $RMSE_{\text{test}} \leq \varepsilon Z$ and $\max\square\ e\square \leq \varepsilon\square$, where εZ is the allowable response error, $e\square$ is the estimation error of the k-th parameter, and $\varepsilon\square$ is its threshold. Tolerance values are determined by the requirements of the specific measurement task. Without experimental data, it is impossible to justify numerical accuracy improvements or modeling time reductions.

The proposed concept aims to create a digital twin of a multi-frequency eddy current probe for rapid signal analysis and measurement planning. Potential applications include testing metal products, assessing electrophysical properties, and compensating for lift-off effects. At the same time, transferability of the model across different sensor designs, object geometries, and thermal conditions requires separate validation.

Thus, accumulation of additional information should be considered not as a mechanical increase in the number of frequencies or data volume, but as a controlled dataset enrichment with measurements yielding the highest expected benefit for identification. This creates methodical prerequisites for reducing computational costs and increasing testing reliability; however, quantitative confirmation of advantages remains a task for future experimental study.

References:

1. Construction of Quasi-DOE on Sobol's Sequences with Better Uniformity 2D Projections / Halchenko V. Ya., Trembovetska R. V., Tychkov V. V., Tychkova N. B. // Applied Computer Systems. – 2023. – vol. 28, no. 1, pp. 21-34. https://doi.org/10.2478/acss-2023-0003

2. Тичкова Н. Б., Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В., Тичков В. В. Розробка методу одночасного визначення розподілів матеріальних властивостей в приповерхневій зоні пласких струмопровідних об'єктів // Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно-небезпечних об'єктах : Всеукраїнська науково-практична інтернет-конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених, Харків, 4 листопада 2025 р. : матеріали конференції. – Харків : ХНАДУ, 2025. – С.71-75.

3. Tychkova N., Halchenko V., Trembovetska R. Determining effectiveness based on the accuracy criterion of the optimization method for reconstructing profiles in the PCA space. In: Scientific Research Methodology – 2025, Proc. Ukr. Scien. and Pract. Conf.: Cherkasy, Nov. 2025. – p. 93-94.

4. Halchenko, V. Y.; Trembovetska, R.; Tychkov, V.; Kovtun, V.; Tychkova, N. Application of Reduced Order Surrogate Models in Compatible Determination of Material Properties Profiles by Eddy Current Method. Electronics, 2025, 14, 212. https://doi.org/10.3390/electronics14010212

***Захарченко О. А.**,студент ХНАДУ*

*Науковий керівник: к.т.н., доц. **Петрукович Д. Є.**, ХНАДУ*

МЕТОД ОЦІНЮВАННЯ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ РЕКОНСТРУЙОВАНИХ ПРОСТОРОВИХ ПОЛІВ ВИМІРЮВАНИХ ПАРАМЕТРІВ

В системах контролю дорожньої техніки температура гідравлічних агрегатів, корпусів насосів і теплообмінників вимірюється у скінченній кількості точок. Для отримання неперервної карти параметра застосовують

реконструкцію. Проте навіть за метрологічно справних сенсорів результат між вузлами мережі залежить від геометрії точок та математичного методу. Тому невизначеність первинного вимірювання і невизначеність реконструкції мають різну природу та потребують роздільного оцінювання [1-3].

Мета роботи – розробити метод формування карти розширеної невизначеності реконструйованого температурного поля, який враховує метрологічні характеристики сенсорів і похибку просторової інтерполяції.

Нехай $T(x,y)$ – температура на нормованій квадратній поверхні $\Omega = [0;1] \times [0;1]$. У точках (x_i,y_i) отримують покази $Y_i = T(x_i, y_i) + \varepsilon_i$. Для демонстрації прийнято незалежні випадкові ε_i з нульовим середнім та стандартним відхиленням 0,35 °C; окрема стандартна невизначеність типу B дорівнює 0,25 °C. Це модельні припущення, а не паспортні характеристики реального датчика.

$$u_s = \sqrt{u_{A^2} + u_{B^2}} = \sqrt{0,35^2 + 0,25^2} = 0,43\,^\circ\text{C}. \qquad (1)$$

Для реконструкції застосовано метод зворотних відстаней (IDW) зі степенем $p = 2$, що не потребує навчання на додаткових даних. Ваги залежать від відстані між точкою реконструкції та вузлами сенсорної мережі [4].

$$T(x,y) = \sum_i w_i(x,y) \cdot Y_i \qquad (2)$$

$$w_i = \frac{d_i^{-2}}{\sum_j d_j^{-2}} \qquad (3)$$

$$\sum_i w_i = 1 \qquad (4)$$

У точці сенсора значення визначається безпосередньо його показом. Розрахунок здійснюється на сітці 101×101 вузол.

Для фіксованих ваг IDW та незалежних входів поширення стандартної невизначеності вимірювань має вигляд [1]:

$$u_{вим}(x,y) = \sqrt{\sum_i w_i^2(x,y) \cdot u_s^2} \,. \qquad (5)$$

За наявності кореляції вхідних вимірювань замість (5) застосовують повну коваріаційну матрицю: $u_{вим}^2 = w^T \sum Y w$. В даному випадку міжканальну кореляцію прийнято нульовою.

Похибка інтерполяції відрізняється від шуму сенсорів: навіть за ідеальних вимірювань реконструкція згладжує локальні максимуми поля. Для дослідження її оцінено окремо, підставляючи в IDW точні значення модельного поля в точках сенсорів. Таким чином не відбувається повторного включення вимірювального шуму.

$$u_{мод} = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_k \left[T_0(x_k, y_k) - T(x_k, y_k) \right]^2} \,. \qquad (6)$$

Тут T_0 – реконструкція за точними значеннями в сенсорних точках, M = 10201 – кількість вузлів контрольної сітки. Показник (6) є глобальною середньоквадратичною характеристикою похибки моделі, а не універсальною точковою стандартною невизначеністю. В межах методу його умовно застосовано як однакову додаткову складову для всіх вузлів. Для реальних об’єктів слід визначати локальну модельну невизначеність за незалежними контрольними даними або просторовою перехресною перевіркою.

$$u_c(x,y) = \sqrt{u_{вим}^2(x,y) + u_{мод}^2}; \quad U(x,y) = 2u_c(x,y) \,. \qquad (7)$$

У співвідношенні (7) передбачається відсутність кореляції між двома складовими та належне коригування систематичного зміщення. Значення k = 2 використано як умовний коефіцієнт охоплення; фактичну ймовірність

охоплення перевірено чисельно. Застосування $k = 2$ не гарантує 95 % охоплення за довільного розподілу похибок.

Для імітації неоднорідного нагрівання корпусу гідравлічного агрегату задано аналітичне температурне поле, яке містить лінійний градієнт, локальну нагріту зону та гармонічне збурення:

$$T(x,y) = 45 + 12exp\left\{-\left[\frac{(x-0{,}68)^2}{0{,}055} + \frac{(y-0{,}68)^2}{0{,}085}\right]\right\} + 5x - 3y + 2\sin\pi x\cos\pi y \text{ °C}. \quad (8)$$

Координати x і y нормовано на довжину та ширину поверхні. Для кожної конфігурації сенсори рівномірно розміщено у вузлах 3×3, 4×4 або 5×5, причому крайні координати дорівнюють 0,06 і 0,94. Випадковий шум сформовано генератором NumPy з початковим числом 20261030; це забезпечує відтворюваність наведених чисел.

На рис. 1 наведено реконструйований розподіл температури для 25 сенсорів. Локальний максимум температури формується в околі (0,68; 0,62). Метод IDW відтворює загальну форму поля, але згладжує максимум і створює просторову неоднорідність похибки.

Білі кружки позначають місця розташування сенсорів. Градації сірого відповідають значенням температури у °C. Під час переходу від 9 до 25 сенсорів просторова дискретизація стає щільнішою, що дозволяє точніше описувати локальні неоднорідності. Однак покращення залежить від структури поля та методу реконструкції і не є гарантовано монотонним для кожної окремої реалізації шуму.

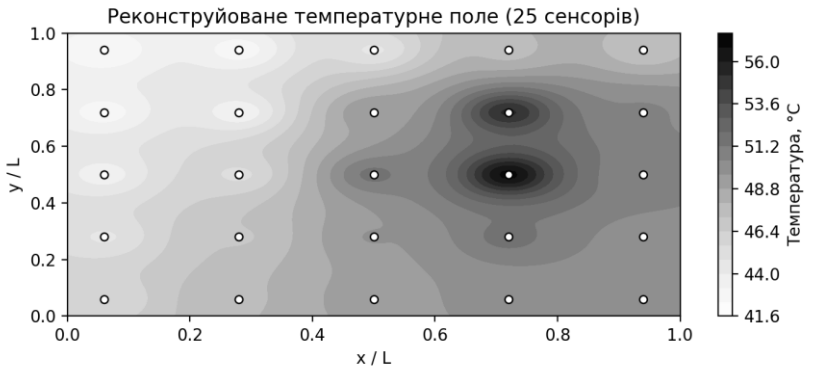


Рисунок 1 – Реконструйоване температурне поле за 25 сенсорами (IDW, $p = 2$)

Для оцінювання результату використано $RMSE = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_k \left(T_k - T_k\right)^2}$, середнє зміщення $b = \frac{1}{M}\sum_k \left(T_k - T_k\right)$, середню розширену невизначеність $\overline{U}$ та емпіричну частку контрольних вузлів, для яких $\left|T - T\right| \le U$. Останній показник є часткою покриття на одній просторовій реалізації, а не частотною оцінкою ймовірності охоплення за повторних незалежних експериментів.

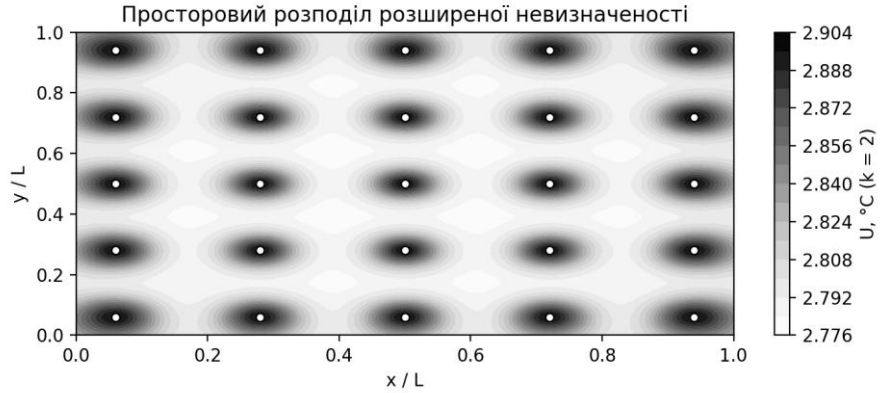


Рисунок 2 – Просторовий розподіл розширеної невизначеності $U(x,y)$ за 25 сенсорами

На рис. 2 показано, що навіть за однакових характеристик сенсорів невизначеність залежить від координат через вагові коефіцієнти IDW.

У точках, де домінує один сенсор, внесок його невизначеності вищий; між кількома сенсорами незалежні складові частково усереднюються. За обраної глобальної моделі uмод просторова зміна U визначається переважно складовою первинних вимірювань.

Таблиця 1 – Порівняльні показники чисельного експерименту

Сенсори	RMSE, °C	Зміщення, °C	$u_{мод}$, °C	$\overline{U}$, °C	Покриття, %
9	2,501	- 0,519	2,530	5,092	92,2
16	1,488	- 0,176	1,475	2,998	93,7
25	1,435	- 0,165	1,383	2,813	93,4

У вузлі з вагами w_i та стандартною невизначеністю кожного сенсора 0,430°C складова $u_{вим}$ обчислюється за (5), після чого до неї квадратично додається $u_{мод}$ з таблиці. Така процедура забезпечує побудову не одного числа для всієї поверхні, а карти $U(x,y)$, придатної для вибору зон додаткового контролю.

Запропонована методика відокремлює два механізми невизначеності: поширення невизначеності вимірювань через ваги інтерполяції та невідповідність реконструкційної моделі реальному просторовому полю. Перший механізм має аналітичний вираз для лінійної за показами моделі IDW; другий оцінюється за незалежною перевіркою реконструкції.

Головне обмеження полягає в тому, що еталонне поле $T(x,y)$ відоме точно, тоді як для реальних об’єктів його необхідно оцінювати контрольними вимірюваннями, що також мають невизначеність. У такому випадку до бюджету потрібно включати невизначеність опорних значень, просторову кореляцію, можливі систематичні ефекти, дрейф сенсорів та похибку визначення їх координат.

Розроблено розрахунковий метод оцінювання невизначеності реконструйованого просторового поля на основі поширення невизначеності первинних вимірювань і незалежної оцінки похибки моделі реконструкції.

Література:

1. JCGM GUM-6:2020**.** Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – Part 6: Developing and Using Measurement Models. Joint Committee for Guides in Metrology, 2020. Офіційний документ JCGM.

2. JCGM GUM-1:2023. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – Part 1: Introduction. Joint Committee for Guides in Metrology, 2023. Офіційний документ JCGM.

3. JCGM GUM-5:2026**.** Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement – Part 5: Examples. Joint Committee for Guides in Metrology, 2026. Офіційний документ JCGM.

4. JCGM 100:2008/Amd.1:2026. Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Amendment 1: Nonlinearity in Measurement Models. Joint Committee for Guides in Metrology, 2026. Офіційний документ JCGM.

Храпський В. В.*,студент ХНАДУ*

Науковий керівник: к.т.н., доц. ***Петрукович Д. Є.****, ХНАДУ*

ОПТИМАЛЬНЕ РОЗМІЩЕННЯ ДАТЧИКІВ ДЛЯ РЕКОНСТРУКЦІЇ ПРОСТОРОВОГО ПОЛЯ ПАРАМЕТРА

Просторові поля температури, деформації або вібрації часто контролюють за обмеженою кількістю вимірювальних точок. Точність відновлення поля залежить не тільки від метрологічних характеристик датчиків, а й від їхніх координат. Надмірна кількість каналів підвищує вартість системи, тоді як невдале розташування може залишати локальні екстремуми невиявленими.

Необхідно визначити координати датчиків, які за фіксованої кількості каналів мінімізують похибку реконструкції заданого класу просторових

полів, та кількісно порівняти результати з традиційними схемами розміщення.

Розглянуто квадратну область $\Omega = [0;1] \times [0;1]$ м² і температурне поле $T(x,y)$.

Результат i-го датчика задається як:

$$Y_i = T(x_i, y_i) + \varepsilon_i \qquad (1)$$

де ε_i – випадкова похибка з нульовим середнім.

Для реконструкції застосовано метод обернено зважених відстаней (IDW) з показником $p = 2$:

$$T(x,y) = \sum_i w_i(x,y) \cdot Y_i ; \quad (2)$$

$$w_i = \frac{d_i^{-2}}{\sum_j d_j^{-2}} ; \qquad (3)$$

$$d_i = \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} . \quad (4)$$

У точці датчика T приймають рівним його виміряному значенню. Сума ваг дорівнює одиниці. Визначення координат $S = (x_i, y_i)$ зводиться до мінімізації середньоквадратичної похибки на незалежній від розташування датчиків контрольній сітці.

Критерій та обмеження оптимізації визначається наступним виразом:

$$RMSE(S) = \sqrt{\frac{1}{M} \sum_j \left[T\left(x_j, y_j; S\right) - T_{ref}\left(x_j, y_j\right) \right]^2} \quad (5)$$

Для чисельного прикладу прийнято $N = 16$ датчиків, $M = 2025$ контрольних точок (сітка 45×45). Допустимі координати обмежено інтервалом [0,015; 0,985] м за кожною віссю. Щоб уникнути скупчення датчиків, введено штраф за міждатчикові відстані менші ніж 0,105 м:

$$J(S) = RMSE_0(S) + 45\sum_{i<j} max(0; 0{,}105 - d_{ij})^2 . \quad (6)$$

Тут $RMSE_0$ – похибка реконструкції без додавання шуму, а штраф має узгоджені з *RMSE* числові одиниці в межах прийнятої моделі. Мінімізацію J виконано методом L-BFGS-B із чотирма стартами. Обрано результат із найменшим значенням цільової функції. Така оптимізація забезпечує локальний мінімум і не доводить глобальної оптимальності.

Як опорну функцію обрано гладке неоднорідне поле з двома локальними тепловими максимумами:

$$T(x,y) = 40 + 25\exp\left\{-\frac{(x-0{,}75)^2 + (y-0{,}3)^2}{0{,}04}\right\} + \\ +15\exp\left\{-\frac{(x-0{,}75)^2 + (y-0{,}3)^2}{0{,}02}\right\} \ {}^0\mathrm{C} \quad (7)$$

Рівномірну схему побудовано на сітці 4×4 у межах 0,08-0,92 м. Випадкову схему сформовано з рівномірного розподілу координат у межах 0,04-0,96 м; вона слугує лише базовим порівнянням і не оптимізується. Для кожної схеми згенеровано 150 реалізацій незалежного нормального шуму $\varepsilon_i \sim N(0;\ 0{,}5^2)$ ${}^0\mathrm{C}^2$. Використано однакові реалізації шуму для всіх схем і фіксоване початкове зерно генератора 20261030.

Оптимізація виконана за незашумленим еталонним полем, а оцінювання показників – на незалежних реалізаціях шуму. Для реального об’єкта потрібні експериментальна ідентифікація поля та перевірка узагальнювальної здатності схеми.

На рисунках 1 і 2 зображено те саме опорне температурне поле. Білі маркери позначають місця встановлення 16 датчиків. Порівняння демонструє, як оптимізація зміщує вимірювальні точки з рівномірної сітки до зон, інформативних для відновлення температурного розподілу.

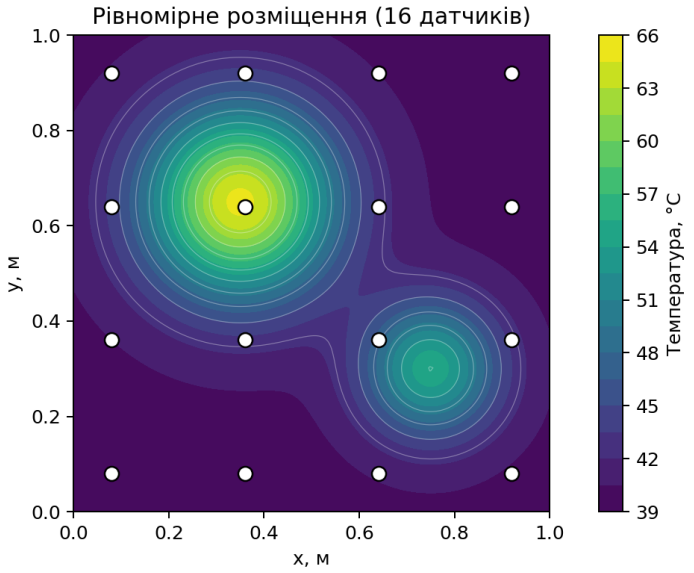


Рисунок 1 – Опорне температурне поле та рівномірне розміщення датчиків

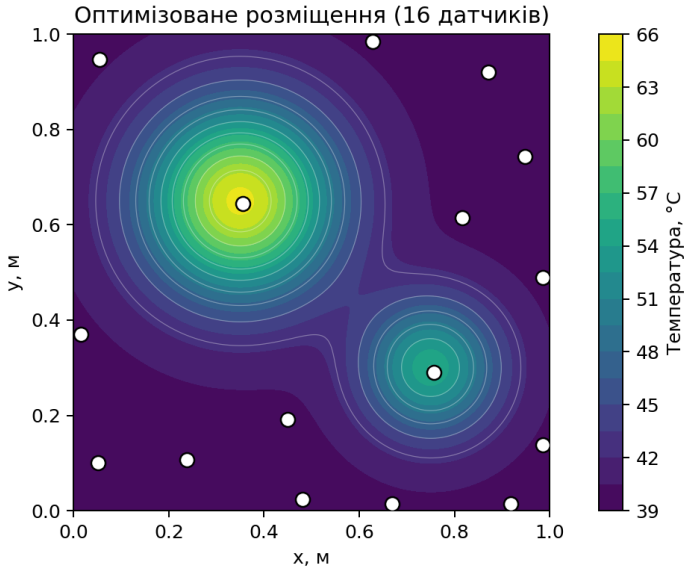


Рисунок 2 – Опорне температурне поле та оптимізоване розміщення датчиків

Показники обчислено для кожної з 150 реалізацій шуму, після чого усереднено. *RMSE* характеризує похибку відновлення всього поля; *MAE* – середнє абсолютне відхилення; *MaxAE* – найбільше абсолютне відхилення на контрольній сітці. Значення ± *SD* описує мінливість *RMSE* між реалізаціями шуму, а не розширену невизначеність вимірювання.

Таблиця 1 – Порівняння схем розміщення 16 датчиків

Схема	*RMSE*, °C	*SD*(*RMSE*), °C	*MAE*, °C	*MaxAE*, °C
Рівномірна	2,709	0,050	2,007	10,768
Випадкова	3,476	0,037	2,710	12,518
Оптимізована	1,227	0,066	0,980	3,303

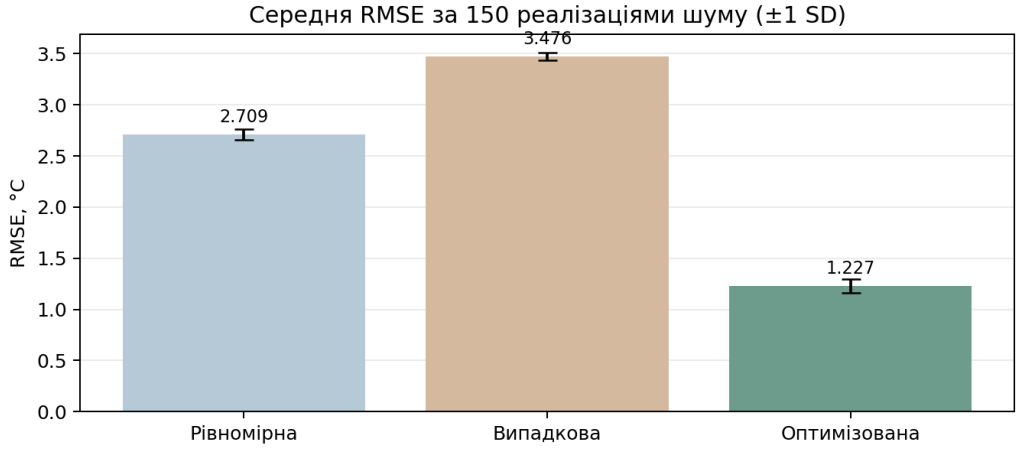


Рисунок 3 – Порівняння середніх *RMSE* для трьох схем розміщення

Середня *RMSE* для оптимізованої схеми становить 1,227 ^{0}C проти 2,709 ^{0}C для рівномірної, тобто зменшення дорівнює 54,7 %. Для випадкової схеми *RMSE* становить 3,476 ^{0}C. Наведені числа стосуються тільки заданого тестового поля, алгоритму IDW і прийнятих умов шуму.

Для незалежних результатів вимірювання зі стандартною невизначеністю u_i = 0,5 ^{0}C складова невизначеності, пов’язана з первинними вимірюваннями, у довільній точці для лінійної моделі IDW дорівнює:

$$u_{meas}(x,y) = \sqrt{\sum_i w_i^2(x,y) \cdot u_i^2} \quad (8)$$

Цей вираз не враховує похибку інтерполяційної моделі. Для оцінювання невизначеності прогнозу потрібна окрема валідація моделі, зокрема за незалежними контрольними вимірюваннями, із розділенням систематичного зміщення та випадкового розсіювання. *RMSE* відносно точно відомої тестової функції є показником якості реконструкції, але сама по собі не дорівнює стандартній невизначеності та не повинна механічно множитися на коефіцієнт охоплення.

Якщо невизначеність моделі реконструкції визначено незалежно від u_{ea} і усунуто або враховано систематичні ефекти, комбіновану стандартну невизначеність можна оцінити як $u_c = \sqrt{u_{meas}^2 + u_{rec}^2}$. Для корельованих складових необхідно додати відповідні коваріаційні члени. Розширена невизначеність $U = k \cdot u_c$ потребує обґрунтованого вибору k та перевірки моделі розподілу.

Проведено експеримент з оптимізації координат 16 датчиків для реконструкції двовимірного температурного поля. За прийнятих умов оптимізована схема забезпечила середню *RMSE* 1,227 ^{0}C, що на 54,7 % менше за рівномірну схему. Результат підтверджує доцільність урахування геометрії розміщення датчиків поряд із їх кількістю та метрологічними характеристиками.

Обмеження дослідження: оптимізація проведена для одного відомого тестового поля, локальним алгоритмом і без урахування реальних монтажних зон. Подальша робота має охопити ансамбль можливих полів, просторово корельовані похибки, монтажні обмеження та незалежну експериментальну валідацію.

Література:

1. Manohar K., Brunton B. W., Kutz J. N., Brunton S. L. Data-Driven Sparse Sensor Placement for Reconstruction: Demonstrating the Benefits of Exploiting Known Patterns. *IEEE Control Systems Magazine*. 2018. Vol. 38, No. 3. P. 63-86. DOI: 10.1109/MCS.2018.2810460.

2. Tajnafoi G., Arcucci R., Mottet L., Vouriot C., Molina-Solana M., Pain C., Guo Y.-K. Variational Gaussian Process for Optimal Sensor Placement. *Applications of Mathematics*. 2021. Vol. 66, No. 2. P. 287-317. DOI: 10.21136/AM.2021.0307-19.

3. Forbes A., Jagan K., Donlevy J., Alves e Sousa J. Optimization of Sensor Distribution Using Gaussian Processes. *Measurement: Sensors*. 2021. Article 100128. DOI: 10.1016/j.measen.2021.100128.

***Tychkov D. V.**, Ph.D., Research Scientist*
***Bondarenko Yu. Yu.**, Candidate of Technical Sciences, Professor, Senior Research Scientist*
***Pinchuk A. M.**, Head of Scientific Research Department*
Scientific Research Institute of Armament and Military Equipment Testing and Certification

DECISION-MAKING CHALLENGES IN OPTIMIZING THE ENERGY EFFICIENCY OF RECONNAISSANCE UNMANNED AERIAL VEHICLES USING DATA MINING WORKSPACES

The use of unmanned aerial systems for reconnaissance purposes in modern conditions requires automatic control systems and operators to make highly accurate decisions in real time. Given the high uncertainty of the external environment, the presence of electronic jamming, and limited onboard energy resources, a critical task is decision-making based on dynamic optimization regarding the allocation of UAV energy resources.

The main contradiction in decision-making during reconnaissance missions lies in the presence of two conflicting criteria:

Maximizing flight duration and range, which requires minimizing power consumption by the propulsion system.

Maximizing the quality and speed of reconnaissance data processing, which requires the constant use of onboard computational resources for onboard artificial intelligence, communication channels, and the gyrostabilization system.

Making an incorrect or delayed decision regarding flight mode or payload operation leads to premature battery depletion and mission failure. Therefore, it is essential to develop a decision-support system based on predictive and analytical modeling of energy consumption.

The decision-making process for managing UAV energy efficiency is complicated by the influence of a multifactorial set of parameters:

external uncontrollable factors: wind speed and direction, vertical air currents, air temperature (which affects the chemical activity and capacity of Li-Ion/LiPo batteries), and barometric pressure.

Internal dynamic parameters: battery pack wear, current aircraft mass, and the operating temperature of onboard computers.

Payload parameters: imaging mode, data transmission rate over the radio channel, and the complexity of real-time object recognition algorithms.

The general decision-making problem [1-3] boils down to multicriteria optimization $\mathbf{F}(\mathbf{X}) \rightarrow \max(\min)$ within the space of constraints:

$$\mathbf{F}(\mathbf{X}) = \begin{cases} T_{flight}(X) \rightarrow \max \\ E_{payload}(X) \rightarrow \max, \\ P_{\Sigma}(X) \leq P_{\max} \end{cases}$$

where X = {υ , h, ω, M_{cam}, P_{tx}} is the decision-making vector (airspeed, altitude, angular rate of maneuver, camera mode, transmitter power).

To make well-founded control decisions, it is necessary to have an adequate predictive model of the UAV's energy state. The operating conditions are characterized by the complexity of the response hypersurface topology, which makes traditional methods ineffective.

To build a representative knowledge base for the decision-making system, computerized methods are used to populate a multidimensional space with test points within a unit hypercube. Among sequence generators (Halton, Chebyshev, and Sobol), the Sobol LP_{τ}-sequences [4] stand out, as they possess the best properties for the uniform distribution of points in the multidimensional search space.

The construction and selection of models for the decision-making system were implemented in the Statistica Data Miner (Data Mining Workspaces) software environment [5]. The project workspace is shown in the figure, where classes of regression models are compared to determine the predictive accuracy of the models in the project.

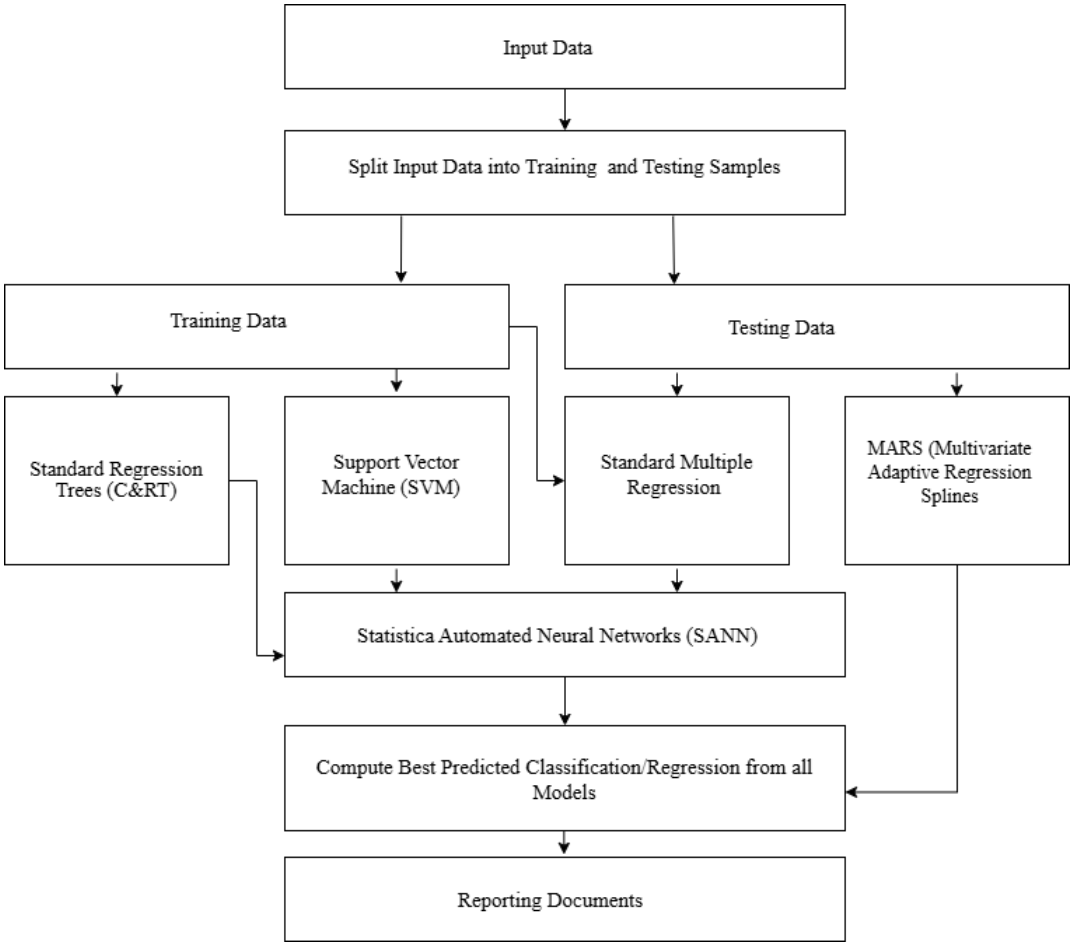


Figure 1 – Structure of the Data Mining Workspaces workspace for developing decision-making systems

A key challenge in developing decision support systems is evaluating the quality and stability of models on independent test samples. The evaluation results are presented in the table.

Table 1 – Comparative characteristics of models for the decision-making module

Modeling method	R^2 (Training)	R^2 (Testing)	Prediction error (W)	Decision-making time (ms)
Standard Multiple Regression	0.99999	0.99995	0.12	0.5
SANN Neural Networks	0.99840	0.99780	0.85	12.0
Support Vector Machine (SVM)	0.99520	0.99410	1.42	5.0
MARS Splines	0.99110	0.98950	2.05	2.0
Decision Trees (C&RT)	0.96500	0.95800	4.15	1.0

The coefficient of determination R^2 characterizes the proportion of the dependent variable's variance explained by the model. In the case of the best model – Standard Multiple Regression with Deployment – the value of R^2 is 0.99999, indicating that over 99.99% of the variation in the response is accounted for and that the model has a high level of adequacy.

To automate the analysis of large volumes of results, the Reporting Documents module uses the intelligent module "Compute Best Predicted Classification / Regression from all Models." This enables the decision support system to automatically select the most suitable model for the current flight mode and to form an ensemble of the two or three best-performing models by averaging them to improve the reliability of decision-making under extreme conditions.

The resulting predictive models form the basis for the following intelligent decision-making strategies in the UAV [6] control system:

- flight mode adaptation: if a headwind exceeding a critical speed is detected, the system lowers the flight altitude to a layer with lower wind resistance or switches to the maximum-duration cruise mode;

- payload optimization: when the battery charge level drops to 25 %, the system shuts down auxiliary onboard computers and reduces the video channel's frame rate to conserve energy.

Mission Adjustment and Termination: Continuous comparison of remaining energy with the calculated energy required to return to base ensures timely activation of the return-to-base mode before critical discharge occurs.

Thus, this paper examines the challenges of decision-making during the optimization of energy consumption for reconnaissance UAVs under conditions of uncertainty and limited resources.

The feasibility of using Sobol's sequences for uniform coverage of the test space and improved analysis quality has been substantiated.

A set of regression models (C&RT, SVM, REG, SANN, MARS) was constructed and compared using Statistica Data Miner. It was determined that the Standard Multiple Regression model provides $^{an}R^2$ of 0.99999, which allows it to be used for rapid decision-making in real time.

The use of the Compute Best Predicted Model module enables the automated selection or combination of the best models, thereby improving the accuracy and reliability of decisions made by the decision support system (DSS) regarding UAV energy resource management.

References:

1. Intelligent Data Analysis: Teaching and Methodological Guide (Part 1) / [Electronic resource] / Edited by R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov. Ministry of Education and Science of Ukraine, Cherkasy State Technological University. – Cherkasy: Cherkasy State Technological University, 2026. – 274 pp.

2. Intelligent Data Analysis: Teaching and Methodological Guide (Part 2) / [Electronic resource] / Edited by R. V. Trembovetska, V. Ya. Halchenko, V. V. Tychkov. Ministry of Education and Science of Ukraine, Cherkasy State

Technological University. – Cherkasy: Cherkasy State Technological University, 2026. – 130 pp.

3. Andrashko, Yu. V. (2026). Formalization of Control Problems for Complex Dynamic Systems Based on Multi-Criteria Discrete Optimization. *Management of Complex Systems Development*, 66, 88-97.

4. Halchenko, V. Ya., Trembovetska, R. V., Tychkov, V. V., and Tychkova, N. B. (2023). Construction of Quasi-DOE on Sobol's Sequences with Better Uniformity in 2D Projections. *Applied Computer Systems*. 28(1), 21-34.

5. TIBCO Statistica® User's Guide, 2024. URL: https://docs.tibco.com/pub/stat/14.0.0/doc/html/UsersGuide/GUID-058F49FC-F4EF-4341-96FB-A785C2FA76E9-homepage.html.

6. Tychkov D. V., Sautin O. O. Study of the operational characteristics of unmanned aerial vehicles (UAVS) with corpus elements manufactured using additive manufacturing methods. In: Testing and Certification of Weapons and Military Equipment. 26th Scientific and Technical Conference Abstracts of Presentations, September 10, 2026. Cherkasy: State Research Institute for Testing and Certification of Weapons and Military Equipment, 2026. 558-560.

Секція 4

Ліквідація наслідків аварій на техногенно небезпечних об’єктах

***Іванісов М. О.**, здобувач вищої освіти*
*Науковий керівник: **Роянов О. М.**, к.т.н., доцент,*
доцент кафедри метрології та безпеки життєдіяльності
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

НЕОБХІДНІСТЬ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ОПЕРАТИВНОСТІ ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ ХІМІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ ТА НАСЕЛЕННЯ

Функціонування сучасних промислових підприємств, хімічних виробництв, нафтопереробних комплексів, об'єктів зберігання небезпечних речовин, транспортної інфраструктури та комунальних систем супроводжується використанням значної кількості хімічних сполук, які за певних умов можуть становити загрозу для людини й навколишнього середовища. Порушення технологічного режиму, розгерметизація обладнання, руйнування резервуарів і трубопроводів, пожежі, вибухи, відмова систем автоматичного захисту обладнання або зовнішнє механічне втручання здатні спричинити неконтрольоване надходження небезпечних речовин у довкілля.

Небезпека таких подій визначається не лише токсичністю конкретної речовини. Важливе значення мають її фізико-хімічні властивості, агрегатний стан, температура, тиск, швидкість і тривалість викиду, характер підстильної поверхні, рельєф місцевості, погодні умови, щільність забудови, розміщення джерел водопостачання та особливості природних екосистем. Взаємодія цих чинників може істотно змінювати напрямок поширення небезпечних хімічних речовин (НХР), швидкість їх розсіювання, тривалість впливу та площу території, на якій виникають небезпечні концентрації.

За відсутності належного прогнозування рішення щодо евакуації, укриття населення, обмеження доступу до забруднених територій,

використання джерел водопостачання та організації аварійно-рятувальних робіт можуть ухвалюватися із запізненням або на основі неповної інформації. Водночас необґрунтоване розширення небезпечної зони здатне спричинити зайве переміщення людей, перевантаження транспортної інфраструктури та служб реагування. Отже, прогнозування має забезпечувати не просто визначення можливого напрямку поширення хімічної речовини, а формування обґрунтованої інформаційної основи для вибору пропорційних і своєчасних захисних заходів.

Актуальність проблеми посилюється необхідністю враховувати аварійні сценарії, зумовлені одночасною дією техногенних і природних чинників. Пошкодження промислового об’єкта внаслідок підтоплення, сильного вітру, екстремальної температури або іншої небезпечної події може спричинити відмову декількох систем безпеки та ускладнити ліквідацію наслідків. Тому сучасне прогнозування повинно ґрунтуватися на системному аналізі небезпек, використанні актуальних вимірювань, багатосценарному моделюванні й оперативному перегляді прогнозів у міру надходження нових даних.

Міжнародна практика промислової безпеки розглядає оцінювання ризиків як основу планування запобіжних заходів, підготовки до аварій та організації реагування. У матеріалах Європейської економічної комісії ООН наголошується на необхідності ідентифікувати небезпечні види діяльності, оцінювати ризики, розробляти плани реагування на території підприємства та за його межами, забезпечувати обмін інформацією і належне інформування населення. Окрему увагу приділено можливим транскордонним наслідкам промислових аварій [1, 2].

В Україні для оцінки хімічної обстановки під час прогнозу масштабів забруднення під час виникнення аварій з виливом або викидом НХР, які знаходяться у технологічному обладнанні та ємностях на території хімічно небезпечних об’єктів, автомобільному, річковому, залізничному та

трубопровідному транспорті використовується Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) НХР під час аварій на хімічно небезпечних об’єктах і транспорті [3].

Слід зауважити, що практичне застосування прогнозних моделей має низку обмежень. Розрахункові результати залежать від повноти початкових даних, точності опису джерела викиду, адекватності математичної моделі та достовірності метеорологічної інформації. Якщо параметри аварії невідомі або оцінені приблизно, модель може відтворити лише діапазон можливих сценаріїв, а не однозначну картину поширення забруднення. Це зумовлює потребу в поєднанні попередніх розрахунків з оперативним моніторингом та постійною перевіркою прогнозу за фактичними вимірюваннями.

Наслідки техногенної аварії хімічного походження формуються під впливом взаємопов’язаних характеристик джерела викиду, властивостей небезпечної речовини, стану навколишнього середовища та умов перебування людей у зоні можливого впливу.

Одним із ключових напрямів прогнозування є математичне моделювання перенесення й трансформації забруднювачів. Для атмосферного повітря використовують моделі, які описують перенесення речовини повітряними потоками, турбулентне розсіювання, осадження, хімічні перетворення та інші процеси.

Спрощені моделі дають змогу оперативно оцінювати можливий напрямок поширення хмари та орієнтовні концентрації за заданих параметрів. Їхньою перевагою є відносно невеликі обчислювальні витрати, що важливо під час первинного реагування. Проте достовірність результатів залежить від виконання модельних припущень, а складна забудова, нестабільна погода, багатофазний викид або істотні зміни параметрів джерела можуть знижувати точність розрахунку.

Більш складні моделі дають змогу детальніше враховувати неоднорідність рельєфу, турбулентність, фізико-хімічні перетворення та

взаємодію забруднювачів з елементами довкілля. Однак вони потребують значного обсягу вихідної інформації, належної обчислювальної інфраструктури та перевірки результатів за експериментальними або моніторинговими даними. Тому вибір моделі повинен визначатися завданням, доступним часом, характером аварії та необхідною деталізацією прогнозу.

Підвищення оперативності прогнозування пов’язане з використанням цифрових технологій, які забезпечують швидке отримання, передавання, оброблення та просторове представлення інформації. До таких технологій належать автоматизовані газоаналізатори, стаціонарні й мобільні станції моніторингу, дистанційні засоби спостереження, геоінформаційні системи, цифрові карти критичної інфраструктури та програмні комплекси моделювання.

Особливу роль відіграють геоінформаційні системи, за допомогою яких можна поєднувати результати моделювання з отриманими даними вимірювань забруднень.

Перспективним напрямом удосконалення системи прогнозування в Україні є створення інтегрованого підходу, у якому прогнозні моделі, оперативний моніторинг, оцінювання ризику, інформування населення та планування реагування функціонують як взаємопов’язані елементи єдиної системи управління хімічною небезпекою. Реалізація такого підходу сприятиме підвищенню обґрунтованості управлінських рішень, скороченню часу реагування та зменшенню потенційних втрат для людей і довкілля.

Література:

1. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). *Risk Assessment for Industrial Accident Prevention*. Geneva: United Nations, 2024. URL: https://unece.org/environment-policy/publications/risk-assessment-industrial-accident-prevention

2. United Nations Economic Commission for Europe (UNECE).

Preparedness and response. Convention on the Transboundary Effects of Industrial Accidents. URL: https://unece.org/environmental-policy/industrial-accidents/preparedness-and-response

3. Методика прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об'єктах і транспорті : затв. наказом Міністерства внутрішніх справ України від 29 листопада 2019 р. № 1000 ; зареєстр. у Міністерстві юстиції України 14 травня 2020 р. за № 440/34723. – Київ : МВС України, 2019.

***Кремінська П. В.**, здобувачка вищої освіти*

*Науковий керівник: **Роянов О. М.**, к.т.н., доцент,*

доцент кафедри метрології та безпеки життєдіяльності

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ОЦІНКА ВПЛИВУ ТЕХНОГЕННОЇ НЕБЕЗПЕКИ УКРАЇНИ НА ЛЮДИНУ ТА НАВКОЛИШНЄ СЕРЕДОВИЩЕ В СУЧАСНИХ УМОВАХ

Техногенна небезпека є одним із важливих чинників, що визначають рівень захищеності населення, стабільність функціонування економіки та стан навколишнього природного середовища [1-3]. Розвиток промисловості, енергетики, транспортних систем, комунального господарства та хімічного виробництва супроводжується використанням складного обладнання, значних обсягів сировини та енергоресурсів, а також сировини та речовин, які за певних умов можуть становити загрозу для людини й довкілля. Відмова технологічних систем, порушення режимів експлуатації, зношення устаткування, пожежі, вибухи та руйнування інженерних споруд здатні спричинити надзвичайні ситуації з різними за масштабом наслідками.

Для України проблема має особливе значення через поєднання промислових, екологічних, інфраструктурних і воєнних чинників ризику. Пошкодження підприємств, енергетичних об’єктів, нафтобаз, транспортних вузлів, гідротехнічних споруд і систем водопостачання може призводити до викидів забруднювачів, пожеж, порушення очищення стічних вод, накопичення відходів руйнування та погіршення санітарних умов. Водночас бойові дії ускладнюють доступ до окремих територій, проведення лабораторних досліджень і систематичне спостереження за станом природних ресурсів.

Техногенна небезпека формується внаслідок функціонування технічних систем, промислових об’єктів та інфраструктури, аварійний стан яких може призвести до загрози життю й здоров’ю людей, пошкодження майна або погіршення стану довкілля. Її рівень визначається поєднанням характеристик джерела небезпеки, імовірності відмови, можливих масштабів наслідків, стану систем захисту та особливостей території розміщення об’єкта.

До основних джерел техногенної небезпеки належать промислові підприємства, хімічні виробництва, нафтопереробні комплекси, енергетичні об’єкти, газо- й нафтопроводи, транспортні системи, гідротехнічні споруди, комунальні мережі, склади небезпечних речовин та об’єкти поводження з відходами.

На промислових підприємствах потенційні загрози пов’язані з розгерметизацією обладнання, витоками токсичних або легкозаймистих речовин, порушенням температурних режимів, відмовами систем автоматизації та захисту. Під час аварій можуть утворюватися небезпечні хмари газів і парів, відбуватися забруднення поверхонь і водних об’єктів, виникати пожежі та вибухи. Особливо небезпечними є події, що супроводжуються одночасним впливом кількох факторів, наприклад токсичних продуктів горіння, підвищеної температури й механічного руйнування конструкцій.

Енергетична інфраструктура має системне значення, оскільки від її роботи залежать водопостачання, опалення, транспорт, зв’язок, медичні установи та промислове виробництво. Пошкодження енергетичних об’єктів може спричинити не лише прямі наслідки, а й каскадні відмови інших систем. Відключення електроенергії, наприклад, здатне порушити роботу вентиляції, насосів, очисних споруд і систем контролю технологічних процесів.

Транспортна інфраструктура становить джерело ризику через можливість аварій із небезпечними вантажами, витоків пального, пожеж, руйнування мостів і пошкодження транспортних вузлів. Наслідки таких подій залежать від виду вантажу, інтенсивності руху, розташування житлової забудови, погодних умов і доступності аварійно-рятувальних служб.

Окрему групу становлять об’єкти водопостачання, водовідведення та поводження з відходами. Порушення роботи цих систем може спричинити надходження недостатньо очищених стічних вод до природних водойм, погіршення якості питної води, накопичення твердих відходів і виникнення санітарних ризиків. Під час тривалих перебоїв у роботі комунальної інфраструктури техногенна небезпека може трансформуватися в комплексну проблему громадського здоров’я.

Важливо враховувати, що аварійність може бути пов’язана не лише з технічними несправностями. До її передумов належать організаційні помилки, недостатня кваліфікація персоналу, порушення регламентів, несвоєчасне технічне обслуговування, недоліки проєктування та недостатня готовність до реагування. Тому оцінювання небезпеки повинно охоплювати як технічний стан об’єктів, так і організацію управління безпекою.

Вплив техногенних подій не обмежується безпосередньою зоною аварії. Забруднювальні речовини можуть переноситися повітряними потоками, потрапляти до річок і підземних вод, накопичуватися в ґрунтах та донних відкладах, включатися в харчові ланцюги. Руйнування об’єктів

водопостачання або енергетики здатне спричинити вторинні ризики навіть за відсутності значного первинного викиду хімічних речовин. Наприклад, припинення електропостачання може порушити роботу насосних станцій і очисних споруд, а це створює додаткові загрози для санітарного стану населених пунктів.

Для населення небезпека проявляється через гострий і хронічний вплив шкідливих факторів, обмеження доступу до безпечної води, погіршення якості повітря, пошкодження житла, порушення медичного забезпечення та втрату звичних умов життєдіяльності. Для довкілля наслідками можуть бути деградація природних оселищ, зменшення біорізноманіття, забруднення земель, погіршення стану водних екосистем і тривале обмеження використання природних ресурсів.

Техногенна небезпека в Україні характеризується поєднанням успадкованих промислових ризиків, нерівномірного розміщення інфраструктури, екологічних проблем минулих періодів і нових загроз, пов’язаних із пошкодженням об’єктів унаслідок воєнних дій.

Частина промислової інфраструктури експлуатується тривалий час, що зумовлює необхідність посиленого контролю технічного стану обладнання, трубопроводів, резервуарів і захисних систем. Старіння матеріалів, корозія, втома металу, зміни технологічних навантажень та недостатнє технічне обслуговування можуть підвищувати ймовірність відмов. Водночас фактичний рівень ризику не можна визначати лише за віком обладнання: необхідні результати обстеження, відомості про режими роботи та дані про наявні бар’єри безпеки.

Воєнні дії створюють додаткові умови для виникнення техногенних подій. Пошкодження промислових підприємств, енергетичних об’єктів, складів пального та комунальних мереж може спричинити пожежі, розливи нафтопродуктів, викиди продуктів горіння, забруднення ґрунтів і порушення роботи природоохоронного обладнання. За таких обставин техногенні

наслідки можуть бути безпосереднім результатом аварії або вторинним наслідком руйнування інфраструктури.

Таким чином, оцінювання техногенної небезпеки України повинно ґрунтуватися на комплексному підході, який поєднує аналіз джерел небезпеки, оцінювання ймовірності небезпечних подій, визначення можливих масштабів впливу, дослідження фактичного стану довкілля та оцінювання наслідків для здоров'я людей. Такий підхід створює інформаційну основу для обґрунтованого управління ризиками, планування заходів цивільного захисту й визначення пріоритетів екологічного відновлення.

Література:

1. Кодекс цивільного захисту України: Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text.

2. Закон України «Про охорону навколишнього природного середовища» від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1264-12#Text.

3. Закон України «Про об'єкти підвищеної небезпеки» від 18.01.2001 № 2245-III. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2245-14#Text.

***Михайлова С. А.**, студ. гр. ММ-61-25, ХНАДУ*

*Науковий керівник: **Богатов О. І.**,*

доцент кафедри МБЖД, к.т.н., ХНАДУ

ПРОГНОЗУВАННЯ НАСЛІДКІВ ТЕХНОГЕННИХ АВАРІЙ ХІМІЧНОГО ПОХОДЖЕННЯ ДЛЯ ДОВКІЛЛЯ ТА НАСЕЛЕННЯ

Аварійні викиди небезпечних хімічних речовин на промислових об'єктах і транспорті становлять загрозу, масштаби якої не можна визначити лише за кількістю речовини, що потрапила в навколишнє середовище.

Розміри та тривалість небезпечного впливу залежать від фізичного стану речовини, умов розгерметизації, метеорологічної ситуації, рельєфу, щільності забудови та перебування людей у зоні поширення хмари. Для практичного реагування важливо не тільки обчислити можливу зону забруднення, а й своєчасно визначити, які саме об’єкти можуть зазнати впливу [1, 3].

В Україні прогнозування наслідків виливу або викиду небезпечних хімічних речовин регламентується Методикою, затвердженою наказом Міністерства внутрішніх справ України № 1000 [1]. Організацію спостережень за радіаційною та хімічною обстановкою визначає окрема Методика [2]. Ці документи формують нормативне підґрунтя для первинних оцінок і використання даних спостережень. Водночас оперативне управління потребує поєднання розрахунків із постійним уточненням інформації, а не одноразового відображення умовної межі небезпечної зони.

У працях із теорії атмосферної дифузії розглянуто гаусівські та інші моделі поширення домішок, які відрізняються припущеннями щодо сталості джерела й метеорологічних умов [4]. Дослідження перенесення забруднювачів у міській забудові засвідчують істотний вплив локальної циркуляції повітря на розподіл концентрацій [5]. Міжнародні принципи запобігання хімічним аваріям і реагування на них акцентують увагу на сценарному аналізі, обміні інформацією та захисті населення [3]. Разом із тим для оперативної практики залишається актуальним питання узгодження швидкого первинного розрахунку, просторової деталізації та оцінки невизначеності.

Метою дослідження є обґрунтування комплексної процедури прогнозування наслідків хімічних аварій для населення і довкілля на основі узгодженого використання моделей поширення речовин, геопросторових даних та результатів оперативних вимірювань. Запропонований підхід має концептуальний характер: він визначає послідовність

інформаційно-вимірювальних і розрахункових операцій, але не замінює нормативні методики або експериментальну перевірку конкретної програмної реалізації.

Перший етап прогнозування полягає в описі джерела аварійного надходження речовини. Необхідно встановити її найменування та агрегатний стан, тип пошкодження, початкові температуру і тиск, оцінку маси викиду, тривалість витікання та наявність засобів локалізації. За відсутності детальної моделі середню масову витрату визначають за співвідношенням:

$$\bar{G} = m / \Delta t, \quad (1)$$

де $\bar{G}$ – середня масова витрата речовини, кг/с;

m – маса речовини, яка надійшла в довкілля, кг;

Δt – тривалість викиду, с.

Формула (1) придатна для попередньої оцінки, проте за змінного тиску або площі пошкодження масову витрату слід розглядати як функцію часу $G(t)$ [1].

Визначення одного сценарію за неповних вихідних даних створює ризик помилкової впевненості в результаті. Тому доцільно формувати щонайменше три взаємопов’язані сценарії: базовий за найбільш обґрунтованими даними, несприятливий із консервативними припущеннями та уточнений за фактичними спостереженнями. Для невідомої швидкості або напрямку вітру можна виконати кілька альтернативних розрахунків. Сукупність отриманих зон характеризує діапазон можливих наслідків, а не статистично довірчий інтервал без додаткового ймовірнісного обґрунтування [1, 3].

Математично перенесення домішки в атмосфері описується балансом адвекції, турбулентного перемішування, надходження та втрат речовини. В узагальненій формі його можна записати як:

$$\partial C/\partial t + \nabla\cdot(uC) = \nabla\cdot(K\nabla C) + S - R, \quad (2)$$

де C – масова концентрація речовини, кг/м³;

t – час, с;

u – вектор швидкості повітря, м/с;

K – тензор коефіцієнтів турбулентної дифузії, м²/с;

S – об’ємна інтенсивність надходження, кг/(м³·с);

R – об’ємна інтенсивність втрат або перетворення, кг/(м³·с);

∇ – оператор просторового диференціювання.

У конкретних розрахунках вигляд і параметри рівняння (2) залежать від прийнятих фізичних припущень та граничних умов [4].

Для швидкого первинного оцінювання за відносно однорідного вітру та нескладної геометрії можуть використовуватися гаусівські моделі. Їх перевага полягає в невеликих обчислювальних витратах і можливості оперативно оцінити напрямок та орієнтовну протяжність небезпечної зони. Водночас вони недостатньо відображають складні рециркуляційні течії поблизу будівель і поведінку важких газових хмар. Спеціалізовані засоби аварійного моделювання, зокрема ALOHA, дають змогу оцінювати різні хімічні загрози, але їх результати також слід інтерпретувати в межах прийнятих моделей [3].

Для нестаціонарних умов застосовують лагранжеві моделі, які описують рух умовних частинок домішки, або ейлерові моделі, що розраховують концентрацію в комірках просторової сітки. У місцях складної забудови додаткову інформацію може забезпечити чисельне моделювання руху рідини й газу, яке відтворює локальні вихори, затінення потоку та можливе накопичення забруднювача. Вибір складнішої моделі доцільний тоді, коли її деталізація здатна змінити практичне рішення, а необхідні геометричні й метеорологічні дані є достатньо надійними [5].

Після первинного моделювання розраховані концентрації або межі зон потрібно поєднати з геопросторовою інформацією. Накладання прогнозованої зони на розміщення житлових кварталів, медичних закладів, шкіл, транспортних шляхів, водних об’єктів і природоохоронних територій дає змогу сформувати перелік потенційно вразливих об’єктів. На цьому етапі фізичний результат моделювання набуває управлінського змісту: визначаються пріоритети спостереження, оповіщення та інших захисних заходів [3].

Для оцінювання можливого впливу на людину важливі не тільки максимальні концентрації, а й тривалість перебування в забрудненому повітрі. Узагальнений показник накопиченої концентраційної експозиції можна подати як:

$$D = \int_0^T C(t)\, dt, \quad (3)$$

де D – інтегральна концентраційна експозиція, кг·с/м³;

$C(t)$ – концентрація у точці перебування людини;

T – тривалість впливу, с.

Показник (3) не є універсальною токсичною дозою: для конкретної речовини необхідно використовувати відповідні токсикологічні критерії, у тому числі залежності з нелінійним впливом концентрації та часу [1].

Для довкілля необхідно окремо розглядати шляхи перенесення речовини. Атмосферне випадіння може спричиняти вторинне забруднення ґрунтів і водних об’єктів, а розлив рідини – поверхневий стік та інфільтрацію. Відповідно оцінка наслідків має враховувати не тільки територію поширення повітряної хмари, а й розташування водозборів, місць водокористування, ґрунтові умови та екологічно чутливі ділянки. Пріоритетність захисту визначається поєднанням очікуваного впливу та вразливості об’єкта.

За наявності обґрунтованих імовірностей сценаріїв узагальнену оцінку ризику можна сформувати як:

$$R = \Sigma_i P_i S_i, \quad (4)$$

де P_i – імовірність реалізації і-го взаємовиключного сценарію ($\Sigma_i P_i = 1$);

S_i – кількісний показник тяжкості його наслідків, виражений в однакових одиницях для всіх сценаріїв.

Якщо достовірних імовірностей немає, застосування формули (4) як точного числового ризику некоректне; натомість доцільне якісне ранжування сценаріїв за небезпекою та тяжкістю наслідків [3].

Важливою відмінністю запропонованої процедури є циклічне оновлення прогнозу. Після надходження нових показань метеорологічних станцій, постів хімічного спостереження або відомостей про стан аварійного обладнання потрібно перевірити їх актуальність, одиниці вимірювання, часові позначки та можливі аномалії. Далі коригуються параметри джерела і метеорологічні умови, повторюється розрахунок та порівнюються попередня і нова зони. Таким чином, вимірювальна інформація стає основою для послідовного зменшення невизначеності [2].

Для забезпечення відтворюваності кожна версія прогнозу повинна супроводжуватися датою і часом обчислення, переліком використаних вимірювань, припущеннями про джерело, назвою математичної моделі та оцінкою якості вхідних даних. Зокрема, похибка визначення напрямку вітру може істотно змінювати перелік територій, які потрапляють до небезпечної зони, навіть за відносно невеликої зміни прогнозованої максимальної концентрації. Тому контроль якості вимірювань і аналіз чутливості мають передувати необґрунтованому ускладненню моделі.

Запропоновану послідовність можна реалізувати як інформаційно-вимірювальну підсистему підтримки рішень: отримання та перевірка даних;

формування сценаріїв; оперативне прогнозування; геопросторове зіставлення; оцінювання експозиції; уточнення за результатами спостережень; передавання актуальної інформації уповноваженим фахівцям. Її вихідними матеріалами мають бути карта зони можливого впливу, часова оцінка розвитку події, перелік вразливих об’єктів та опис невизначеності. Автоматизована рекомендація не повинна підміняти відповідальне рішення посадової особи [3].

Практичне застосування підходу має низку обмежень. Без перевірених відомостей про речовину та характер пошкодження навіть складна модель не гарантує достовірного результату. Високодеталізовані обчислення потребують належної геометричної моделі, коректних граничних умов і перевірки чисельної збіжності. Перспективним напрямом є використання попередньо обчислених сценаріїв і швидких наближених моделей, однак їх допустимо застосовувати лише в межах умов, для яких підтверджено відповідність фізичним розрахункам.

Отже, прогнозування наслідків техногенних аварій хімічного походження доцільно організовувати як багаторівневу процедуру, у якій швидкість первинної оцінки поєднується з вибірковим уточненням небезпечних ділянок. Основним результатом роботи є узгоджена схема переходу від характеристик джерела й вимірювань до просторово визначених пріоритетів захисту населення та довкілля. Її науково-практичне значення полягає у формалізації зворотного зв’язку між вимірюванням, моделюванням і рішенням. Подальші дослідження мають передбачати випробування алгоритму на реальних або контрольованих сценаріях із кількісним оцінюванням похибок, часу обчислення та стійкості результатів.

Література:

1. Про затвердження Методики прогнозування наслідків виливу (викиду) небезпечних хімічних речовин під час аварій на хімічно небезпечних об’єктах і транспорті : наказ МВС України від 29.11.2019

№ 1000 (редакція від 27.11.2024). URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0440-20 (дата звернення: 18.10.2026).

2. Про затвердження Методики спостережень щодо оцінки радіаційної та хімічної обстановки : наказ МВС України від 27.11.2019 № 986. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0083-20 (дата звернення: 18.10.2026).

3. OECD. OECD Guiding Principles for Chemical Accident Prevention, Preparedness and Response. 3rd ed. Paris : OECD Publishing, 2023. 180 p. DOI: 10.1787/162756bf-en.

4. Turner D. B. Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates: An Introduction to Dispersion Modeling. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press, 1994.

5. Tominaga Y., Stathopoulos T. CFD simulation of near-field pollutant dispersion in the urban environment: A review of current modeling techniques. Atmospheric Environment. 2013. Vol. 79. P. 716-730. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.07.028.

***Пасічник Костянтин**, студент магістратури, гр. А-51-26*

*Науковий керівник: **Кравцов Михайло**, к.т.н., доцент кафедри МБЖД*

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

СПЕЦИФІКА ЛОКАЛІЗАЦІЇ ТА ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ АВАРІЙ НА АЕС ТА ОБ’ЄКТАХ ВИКОРИСТАННЯ ЯДЕРНОЇ ЕНЕРГІЇ

Ядерна енергетика посідає критично важливе місце в енергетичному балансі багатьох держав, проте її експлуатація супроводжується потенційними ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Аварії на атомних електростанціях (АЕС) та інших об'єктах ядерно-паливного циклу відрізняються від інших промислових катастроф масштабністю наслідків, трансграничним характером забруднення та довготривалістю впливу на навколишнє середовище й здоров'я людини.

Специфіка локалізації та ліквідації таких аварій зумовлена фізико-хімічною природою іонізуючого випромінювання, складністю реакторних установках і жорсткими вимогами до нормативно-правового та технічного регулювання [1].

Класифікація ядерних подій та особливості їх небезпеки. Для оцінки масштабів подій на ядерних об'єктах використовується Міжнародна шкала ядерних і радіаційних подій (INES), яка поділяє їх на аномалії, інциденти, аварії (від рівня 4 до 7).

Специфіка радіаційної небезпеки полягає в таких чинниках:

- Відсутність органолептичного контролю: іонізуюче випромінювання неможливо побачити, почути, відчути на запах чи смак без спеціальних приладів.
- Пролонгована дія: радіонукліди (такі як Цезій-137, Стронцій-90, Плутоній-239) мають тривалі періоди напіврозпаду, що зумовлює забруднення території на десятиліття або століття.
- Біологічна активність: здатність радіонуклідів накопичуватися в ланцюгах живлення (ґрунт – рослини – тварини – людина) [2] .

Технічні аспекти локалізації аварій на реакторних установах. Сучасні проєкти АЕС базуються на концепції глибокоешелонованого захисту, яка передбачає систему бар'єрів на шляху розповсюдження радіоактивних продуктів: паливна матриця, оболонка тепловидільного елемента (ТВЕЛ), корпус реактора та головний циркуляційний контур, а також захисна оболонка (контейнмент).

Основні технічні елементи локалізації аварій:

- Захисна оболонка (контейнмент): залізобетонна герметична споруда, здатна витримувати надлишковий тиск, зовнішні ударні навантаження та утримувати викиди радіоактивних речовин у разі розгерметизації первинного контуру.

- Локалізатори розплаву активної зони («пастки палкого палива» / core catcher): спеціальні пристрої, розміщені під корпусом реактора, призначені для прийому та охолодження розплавленої суміші активної зони у гіпотетичних аваріях з важким пошкодженням реактора (класу severe accident).
- Системи пасивного відведення тепла (СПВТ): працюють за рахунок природної циркуляції повітря та води без потреби в електричному живленні, що критично важливо у разі повного знеструмлення станції (SBO – *Station Blackout*).
- Системи зниження тиску та рекомбінації водню: запобігають вибухам вибухонебезпечних сумішей газів (водню та кисню) усередині контейнменту [3].

Організація робіт із ліквідації наслідків. Процес ліквідації наслідків ядерної аварії поділяється на кілька послідовних фаз: ранню (аварійну), проміжну та пізню (відновну).

А. Рання фаза (від кількох годин до діб)

- Приведення в дію аварійних планів: оповіщення персоналу, державних органів управління, МНС/ДСНС та МАГАТЕ.
- Захист персоналу станції: використання засобів індивідуального захисту (ЗІЗ), постійний дозиметричний контроль, обмеження часу перебування в зонах підвищеної радіації.
- Захисні заходи щодо населення:
  - Проведення йодної профілактики (блокування щитоподібної залози стабільним йодом).
  - Евакуація або укриття в захисних спорудах у межах зон планування захисних заходів (Зона небезпеки та Зона спостереження) [4].

Б. Проміжна та відновна фази

- Радіаційний моніторинг довкілля: вимірювання щільності забруднення ґрунтів, води, повітря та сільськогосподарської продукції.

- Дезактивація території та об’єктів: очищення будівель, дорожнього покриття, техніки за допомогою спеціальних розчинів, зняття забрудненого шару ґрунту.
- Поводження з радіоактивними відходами (РАВ): збір, тимчасове зберігання та подальше поховання утилізованих матеріалів, ґрунту й конструкцій.

Сучасні виклики та особливості реагування в умовах гібридних загроз. У сучасних реаліях безпека об'єктів використання ядерної енергії стикається з новими викликами, пов'язаними із зовнішніми загрозами, військовими конфліктами та кібератаками на критичну інфраструктуру.

- Втрата зовнішнього електропостачання та води для охолодження: потребує наявності резервних дизель-генераторів, мобільних насосних станцій та запасів палива[5, 6] .
- Фізична безпека персоналу: робота в умовах психологічного тиску, дефіциту кадрів або обмеженого доступу до об'єкта.
- Координація національних та міжнародних структур: взаємодія з МАГАТЕ, державними інспекціями ядерного регулювання та військовими формуваннями для забезпечення стабільного режиму безпеки [7, 8] .

Висновки. Локалізація та ліквідація аварій на АЕС і ядерних об'єктах вимагає комплексного підходу, що поєднує інженерно-технічні рішення високого рівня надійності (багаторівневі пасивні та активні системи безпеки) з чітко відпрацьованими алгоритмами реагування персоналу та державних служб. Головним пріоритетом залишається запобігання неконтрольованому виходу радіоактивних продуктів у довкілля шляхом збереження цілісності бар'єрів безпеки та своєчасне впровадження контрзаходів для захисту життя і здоров'я людей.

Література:

1. Державні санітарні правила та норми. Норми радіаційної безпеки України; доповнення: Радіаційний захист від джерел потенційного опромінення (ДРБУ-2023). Київ : МОЗ України, 2023. 82 с.

2. Носовський А. В., Власов М. В., Козоріз В. В. Аварії з важким пошкодженням активної зони на АЕС з реакторами ВВЕР: моніторинг, управління та мінімізація наслідків. *Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля*. 2021. Вип. 36. С. 45-54.

3. Скалозубов В. І., Габлай К. В., Кочнєв Є. В. Науково-методичні основи забезпечення безпеки АЕС в умовах гібридних і військових загроз. *Ядерна та радіаційна безпека*. 2023. № 2 (98). С. 12-21.

4. International Atomic Energy Agency (IAEA). Considerations on the Severe Accident Management and Emergency Response for Nuclear Power Plants under Extreme Events. IAEA TECDOC No. 1994. Vienna : IAEA, 2022. 142 p.

5. Захаров О. В., Корольов О. В., Тіщенко В. М. Управління ризиками виникнення радіаційних аварій на критичних об’єктах енергетики. *Безпека життєдіяльності та цивільний захист*. 2024. № 1 (45). С. 18-26.

6. Кривошеєв В. М., Бондаренко А. О. Методологія дезактивації обладнання та територій АЕС після аварійних ситуацій. *Екологічні науки*. 2025. Вип. 42. С. 102-111.

7. International Atomic Energy Agency (IAEA). Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency. IAEA Safety Standards Series No. GSR Part 7 (Rev. 1). Vienna : IAEA, 2022. 120 p.

8. International Atomic Energy Agency (IAEA). Considerations on the Severe Accident Management and Emergency Response for Nuclear Power Plants under Extreme Events. IAEA TECDOC No. 1994. Vienna : IAEA, 2022. 142 p.

***Пивовар Дмитро**, студент групи АА-51-26*
*Науковий керівник: **Кравцов Михайло**, к.т.н., доцент кафедри МБЖД*
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

МЕТОДИ ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ РИЗИКІВ ВИНИКНЕННЯ НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЙ ТЕХНОГЕННОГО ХАРАКТЕРУ

Інтенсивний розвиток промислового виробництва, транспортної інфраструктури та енергетичних комплексів супроводжується підвищенням рівня потенційної небезпеки для суспільства й довкілля. Умови функціонування критичної інфраструктури вимагають переходу від традиційної реактивної парадигми (ліквідація наслідків аварій) до превентивної моделі управління техногенною безпекою, що базується на науково обґрунтованих методах оцінки та прогнозування ризиків.

Головним завданням сучасних досліджень у сфері цивільного захисту є розробка комплексних інструментів, які дозволяють не лише констатувати ймовірність виникнення надзвичайних ситуацій (НС) техногенного характеру, а й здійснювати багатоваріантне моделювання їх розвинутих сценаріїв із мінімізацією можливих соціальних, економічних та екологічних втрат [1].

Теоретико-методологічні засади аналізу техногенних ризиків. У теорії безпеки життєдіяльності та техногенної безпеки ризик виникнення НС розглядається як кількісна міра реалізації небезпеки, що визначається комбінацією ймовірності (частоти) настання події та масштабу її негативних наслідків. Методологічний базис оцінки ризиків охоплює три взаємопов’язані етапи [2]:

1. Ідентифікація небезпек (виявлення джерел потенційних аварій, факторів ризику та вразливих елементів системи).

2. Оцінка ризиків (якісне та кількісне визначення ймовірності й тяжкості наслідків).

3. Управління ризиками (розробка та впровадження превентивних інженерних, організаційних та управлінських заходів).

Класифікація методів оцінки базується на ступені деталізації вихідних даних та рівнях формалізації процесів. Виділяють якісні, кількісні та змішані (напівкількісні) методи. Вибір конкретного підходу залежить від стадії проєктування або експлуатації об'єкта підвищеної небезпеки, наявності статистичних даних та специфіки технологічних процесів.

Якісні та напівкількісні методи оцінки ризиків. Якісні методи застосовуються на початкових етапах аналізу або в умовах дефіциту статистичних даних. Вони дозволяють виявити потенційні слабкі місця в техногенних системах та визначити домінуючі фактори небезпеки:

- Метод «Що буде, якщо...» (What-If Analysis): Систематичний постатейний розгляд можливих відхилень від нормального режиму роботи обладнання з оцінкою можливих наслідків.
- Аналіз небезпек та працездатності (HAZOP – Hazard and Operability Study): Структурований метод виявлення відхилень технологічних параметрів (тиску, температури, витрати) від регламентних значень із використанням спеціальних керівних слів.
- Матриці ризиків (Risk Matrix): Напівкількісний інструмент, що забезпечує ранжування ризиків на основі категорій імовірності (від вкрай малоймовірних до частих) та тяжкості наслідків (від незначних до катастрофічних).

Незважаючи на простоту застосування, якісні методи суб'єктивні та залежать від кваліфікації експертної групи, що обмежує їх використання для точного інженерного прогнозування [3].

Кількісні методи та інженерний аналіз безпеки. Для глибокого аналізу складних техногенних об'єктів (хімічні підприємства, АЕС, магістральні

трубопроводи) використовуються детерміністичні та стохастичні кількісні методи:

- Аналіз дерев відмов (Fault Tree Analysis – FTA): Логіко-графічний метод дедуктивного типу, що визначає комбінації відмов обладнання та помилок персоналу, які призводять до конкретної аварійної події (вершини дерева). Дозволяє розрахувати загальну ймовірність аварії на основі ймовірностей первинних подій.
- Аналіз дерев подій (Event Tree Analysis – ETA): Індуктивний метод, який моделює розвиток аварії від ініціюючої події через ланцюжок спрацювання або неспрацювання систем захисту до кінцевих наслідків.
- Детерміністичне моделювання наслідків: Розрахунки фізико-хімічних процесів при аваріях (вибухи паливо-повітряних сумішей, розливи токсичних рідин, термічне випромінювання факелів) за допомогою стандартизованих математичних моделей поширення хмар зараження, ударних хвиль та теплових потоків.

Методи та моделі прогнозування надзвичайних ситуацій. Прогнозування НС техногенного характеру спрямоване на визначення просторово-часових характеристик потенційних аварій та їх динаміки. У сучасній практиці застосовуються такі групи прогностичних моделей:

1. Імітаційне моделювання (Simulation Modeling): Створення комп'ютерних моделей поведінки складних систем в умовах аварійних збурень. Дозволяє візуалізувати розвиток аварії в реальному часі з урахуванням метеорологічних умов рельєфу місцевості та щільності забудови.

2. Стохастичне прогнозування та теорія випадкових процесів: Використання марківських ланцюгів та рівнянь Колмогорова-Чепмена для оцінки переходу техногенних систем зі сталого стану в аварійний з часом.

3. Сценарний аналіз (Scenario Analysis): Розробка комплексних сценаріїв («worst-case scenario», «most probable scenario») для оцінки стійкості

інфраструктури до каскадних аварій (коли одна техногенна аварія провокує серію інших [4].

Перспективи розвитку та цифровізація методології оцінки ризиків. Сучасний етап розвитку методів оцінки й прогнозування техногенних ризиків характеризується активною інтеграцією передових інформаційних технологій:

- Геоінформаційні системи (ГІС): Забезпечують просторову прив'язку зон ризику, моделювання маршрутів евакуації та оперативне планування рятувальних робіт.
- Концепція цифрових двійників (Digital Twins): Побудова віртуальних копій потенційно небезпечних об'єктів для моніторингу їх стану в режимі реального часу та прогнозування залишкового ресурсу обладнання.
- Машинне навчання та штучний інтелект: Обробка великих масивів даних (Big Data) з датчиків моніторингу для раннього виявлення передумов виникнення аварій (аномалій у роботі агрегатів) [5].

Висновки. Ефективна система запобігання надзвичайним ситуаціям техногенного характеру потребує синергетичного поєднання класичних інженерних методів (FTA, ETA, моделювання фізичних полів) та сучасних цифрових технологій (імітаційне моделювання, ГІС-аналіз, алгоритми предиктивної аналітики). Подальший розвиток методології оцінки й прогнозування ризиків має бути спрямований на підвищення точності моделювання каскадних аварій в умовах невизначеності, що дозволить мінімізувати техногенні загрози для суспільства та довкілля.

Література:

1. Закон України «Кодекс цивільного захисту України» від 02.10.2012 № 5403-VI (зі змінами та доповненнями).

2. ДСТУ 7552:2014. Цивільний захист. Оцінювання ризиків надзвичайних ситуацій. Загальні положення. – К. : Мінекономрозвитку України, 2015. – 18 с.

3. Бедринець М. Д., Волянський П. Б., Гринкевич В. О. Управління ризиками виникнення надзвичайних ситуацій техногенного та природного характеру : навч. посіб. – К. : НДУ ЦЗ, 2020. – 248 с.

4. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці та цивільного захисту : підручник. – Львів : Українська академія друкарства, 2021. – 360 с.

5. Євграфов М. М., Козяр М. М., Шарабатов І. І. Інженерні методи аналізу безпеки складних технічних систем : монографія. – Харків : ХНАДУ, 2022. – 216 с.

***Табуненко В. О.**, кандидат технічних наук, доцент, професор*

***Воловодюк А. С.**, заступник начальника факультету по ННР*

Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

АНАЛІЗ ТА ПОПЕРЕДЖЕННЯ ТРАВМАТИЗМУ В ЗБРОЙНИХ СИЛАХ УКРАЇНИ

Активні бойові дії на території України, які розпочалися у лютому 2022 року принесли широкий спектр травм причинами яких стають механічні впливи (мінно-вибухові, вогнепальні та інші), психологічні чинники (посттравматичний розлад та бойовий стрес), фактори впливу зовнішніх середовищ (радіоактивний випромінювання, електричний струм, хімічні речовини, термічний), аналіз яких становить значний інтерес з метою їх вивчення та можливого попередження.

Травмою (trauma – ушкодження, грец.) називається одномоментний вплив зовнішнього чинника, що викликає у тканинах людини місцеві анатомічні та функціональні порушення, що супроводжуються реакціями організму [1]. Зростання числа військовослужбовців, які отримали травму, негативно позначається на їх тимчасовій непрацездатності. Значні втрати серед особового складу, отримані каліцтва та травми знижують боєздатність військових частин та їх підрозділів, спричиняють значні моральні та

матеріальні витрати. Особливої гостроти ця проблема набуває у зв'язку з появою великої кількості поранених та інвалідів з ампутованими кінцівками, створює великі труднощі для психологічної та соціальної адаптації їх у суспільстві, які найбільш явно демонструють трагічні наслідки війни, розв'язаної рф. Зростання кількості інвалідів внаслідок воєнних дій в Україні негативно позначається на загальному здоров'ї населення, соціальному самопочутті суспільства, на усіх рівнях його інтеграції.

Травматизм військовослужбовців – це сукупність травм, одержаних військовослужбовцями Збройних Сил України (ЗСУ) у процесі участі у бойовій та небойовій діяльності за встановлений період часу внаслідок впливу на них небезпечних чи шкідливих факторів, що підвищують можливість нещасних випадків. Під військовим травматизмом прийнято розуміти загальну кількість тілесних ушкоджень, що виникають у військовослужбовців у воєнний чи мирний час. Травматизм воєнного часу складається з бойового та небойового травматизму. Травматизм мирного часу включає травматизм під час виконання обов'язків військової служби та побутового травматизму.

Бойовий травматизм включає в себе фізичні і психологічні травми, отримані в умовах ведення бойових дій. Під фізичними травмами розуміємо отримані поранення, контузії, переломи та інші тілесні ушкодження, що сталися у районі ведення бойових дій з боку противника. Психологічні травми, такі як синдром бойового стресу та бойові психічні травми, виникають внаслідок впливу стресових факторів бойової обстановки, таких як загроза для життя або втрата бойових побратимів [2].

Небойовий травматизм – це травми, отримані внаслідок нещасних випадків, які не пов'язані з бойовими діями, і які не стосуються виконання обов'язків військової служби. До небойового травматизму відносяться травми, отримані в побуті, внаслідок необережних чи непродуманих дій

самих потерпілих при отриманні травми, навіть якщо потерпілі перебувають у зоні бойових дій.

Військовий травматизм може бути пов’язаний або не пов’язаний із виконанням обов’язків військової служби. Обставини, у яких травматизм військовослужбовців належить до виконання обов’язків військової служби [3]: при виконанні розпорядку дня на території військової частини або знаходженні у відрядженні; під час виконання державних обов'язків, включаючи випадки, коли вони не були пов'язані виконанням обов'язків військової служби; при знаходженні у складі добового наряду; при виконанні завдань з розпорядження командира військової частини у неслужбовий час, вихідні, святкові та неробочі дні та території військової частини та за її межами; у прямуванні на службу або зі служби, під час службових поїздок, пішки або на будь-якому транспорті, незалежно від форми його власності; виконання дій, які не входять до службових обов'язків щодо попередження виникнення аварій або порятунку людського життя або державної власності, включаючи підтримку військової дисципліни; участь у масових акціях, спортивних змаганнях, що проводяться за рішенням командира частини; прямування до місця відрядження або назад на транспортному засобі незалежно від його форми власності; одержання тілесних ушкоджень під час виконання обов'язків військової служби; при отриманні травми через погіршення стану здоров'я під дією небезпечних або шкідливих факторів під час виконання обов'язків військової служби; смерті військовослужбовця внаслідок захворювання чи травми, раніше отриманих, під час виконання обов'язків військової служби.

Обставини, у яких травматизм військовослужбовців не належить до виконання обов'язків військової служби [3]: при проживанні військовослужбовця за межами території військової частини; при знаходженні військовослужбовця у відпустці чи добовому звільненні з розташування військової частини; при алкогольному, токсичному або

наркотичному сп’янінні, яке не пов’язане з технологічним процесом виконання службових обов’язків; при використанні в особистих цілях без відома командира транспортних засобів, озброєння, інструментів та матеріалів, що належать військовій частині; при створенні умисного кримінального правопорушення; при навмисному заподіянню шкоди своєму здоров’ю; при самовільному залишенню військової частини; при природній смерті внаслідок загального захворювання чи самогубства.

До попередження травматизму в ЗСУ належить комплекс заходів, спрямованих на зниження ризику травм військовослужбовцями під час несення служби, бойової підготовки, повсякденної діяльності та позаслужбового часу. Основні напрямки роботи включають навчання, організацію занять з військовослужбовцями з експлуатації озброєння та військової техніки, а також контроль з боку командирів усіх рангів за дотриманням техніки безпеки під час виконання робіт та своєчасного проведення інструктажів.

Наприкінці доповіді було зроблено висновки: о том що військовий травматизм є серйозною проблемою, яка потребує уваги та вжиття усіх заходів для зниження його рівня. Профілактичне попередження травматизму – це безперервна робота командирів усіх рівнів з навчання, організації занять та експлуатації техніки, контролю за дотриманням техніки безпеки.

Література:

1. [Електронний ресурс] https://studfile.net/preview/16573166/

2. Основи охорони праці. Навчальний посібник / Ю. О. Кусакін, В. М. Уваров, В. О. Табуненко, С. М. Хабоша. / За ред. В.О. Табуненко – Харків : ХНУПС, 2024. – 208 с.

3. Наказ Міністерства оборони України від 27.10.2021 № 332 Про затвердження Інструкції про розслідування та облік нещасних випадків з військовослужбовцями, професійних захворювань і аварій у Збройних Силах України.

***Табуненко В. О.**, к.т.н., доцент, професор*
***Сальник О. В.**, старший науковий співробітник*
Науково-дослідної лабораторії
Харківський національний університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба

ТАЄМНА ЗБРОЯ ТА ЇЇ НАСЛІДКИ

На даний час можемо виділити такі основні види зброї:

– зброя масового ураження, яка в свою чергу поділяється на наступні види: а) ядерну зброю, б) хімічну зброю та в) біологічну зброю:

– звичайна зброя, яка використовується при локальних і широкомасштабних бойових діях, куди входять осколково-фугасні боєприпаси, запалювальні боєприпаси, бетонобійні боєприпаси, кумулятивні боєприпаси, касетні боєприпаси та інші. Основною вражаючої дії таких боєприпасів є надлишковий тиск на фронті ударної хвилі, що виникає внаслідок детонації паливно-повітряної суміші, котра створюється за рахунок вибуху оболонки боєприпасів об'ємного вибуху. Надлишковий тиск таких боєприпасів поблизу центра вибуху досягає 3000 кПа, а на відстані 100 м від центра вибуху – 10 кПа;

– засоби радіоелектронної боротьби, які не ведуть до знищення споруд, але надзвичайно шкідливі для людини.

Останні кілька десятиліть з'явилися нові нетрадиційні види озброєння, такі як радіочастотна зброя, радіологічна зброя, інфразвукова зброя, променева зброя та геофізична (або тектонічна) зброя.

Тектонічна зброя (або «сейсмічна зброя») – це гіпотетичний пристрій або система, за допомогою яких можна штучно викликати землетруси, виверження вулканів, цунамі або схожі явища в певній місцевості шляхом тиску на природні геологічні процеси. Вперше цей термін був визначений у 1992 р. радянським вченим Миколаєвим О. В., який визначив його як щось,

здатне призвести до руйнівного землетрусу, використовуючи накопичену тектонічну енергію надр. Нам відомі дві секретні радянські програми «Вулкан» та «Меркурій-18», які координувалися Інститутом геології, де відзначалися успішні досліди щодо «перенесення енергії вибуху заряду хімічних речовин та намічалася програма створення сейсмічної зброї терміном на 10 років [1].

29 липня 2025 року біля східного узбережжя Камчатського півострова стався землетрус магнітудою 8,8 балів за шкалою Ріхтера. Цей землетрус став найсильнішим протягом останніх чотирнадцяти років, він не був виключно природною подією, це була демонстрація рф нової секретної зброї розробленою для маніпуляції з земною корою та тектонічними плитами за рахунок сили природи та природні катастрофи, які і так є часто безжальними і дійсно стихійними лихами, які приносять велику шкоду руйнуваннями та приводять до загибелі великою кількістю людей. Порушення земного балансу, пов’язаного з тектонічними плитами загрожує катастрофами [2].

Ця подія викликала спекуляції того, що рф використала нову таємну тектонічну зброю провівши підводний імовірно ядерний вибух, який спровокував цунамі. На сьогоднішній день рф – це єдина країна в світі погрожує іншим державам застосуванням такої зброї та є подразником світової безпеки з метою створення природних катастроф.

Цей землетрус спричинив цунамі. Одночасно на Камчатці стався сильний землетрус, де розташовано російська стратегічна база підводних човнів у селищі «Рибачому». Камчатку накрило цунамі після потужного землетрусу, що зруйнувало стоянку бази атомного флоту рф, яка мала десять пірсів для підводних ядерних човнів, як показали супутникові знімки. Слід зауважити, що «Росатом» більше не тягне енергетику сам через високі ставки та обмеження на міжнародному ринку. При провалі внутрішніх економічних проектів рф грає в геополітику, укладає меморандум з африканськими країнами про «мирний атом», щоб обійти санкції та дістатися до

африканського урану. Кремль мусить вливати гроші, бо санкції зламали систему. В теперішній час рф стала банкротом з ядерною кнопкою.

База підводних човнів була ключовим об'єктом Тихоокеанського флоту рф, де базуються підводні човни з ядерними ракетами. На цій базі знаходяться підземні бункери для зберігання ядерних боєголовок та стратегічні ракетоносії з міжконтинентальними балістичними ракетами. Землетрус сколихнув Сахалін та Курильські острови, а після нього сталося ще 30 відчутних поштовхів з інтенсивністю від двох до п'яти балів. У Петропавловську-Камчатському було введено режим надзвичайної ситуації у зв'язку із землетрусом. На берег Северокурильска обрушилися три хвилі заввишки чотири метри, водою затопило прибережні райони міста, де знаходяться порти та заводи. Загрозу цунамі було оголошено в Японії, Китаї, Новій Зеландії, Філіппінах, Алясці, на американських Гавайських островах та інших регіонах країн Тихого океану [3].

Відомо, що в рф продовжують дослідження технології радянських програм «Вулкан» та «Меркурій-18», які досліджували методи землетрусу через магнітні імпульси або ядерні вибухи. Цунамі у 1996 році, що досягло Японії, Гавайїв та інших регіонів Тихого океану було частиною демонстрації здатності рф впливати на глобальні події без прямого військового втручання, класичного нападу за допомогою ракет, літаків та наземною технікою як наприклад ворог втручався за рахунок повномасштабного нападу на територію України. Результатом такого нападу рф хоче налякати європейські країни, показати що у неї є такі спроможності та здатності. Таким чином рф хоче показати свою технологічну перевагу та відсталість інших країн і змусити США йти на поступки в глобальному контексті геополітичної картини світу, щоб визнали себе світовим гравцем з яким необхідно рахуватися і враховувати позиції в подальшому розвитку.

Наприкінці доповіді було наведено презентацію з показом супутникових знімків та пояснювальним матеріалом щодо версії з використання

тектонічної підводної зброї та можливості її застосування рф для перевірки своєї технології, що здатна викликати природні катастрофи.

Література:

1. Тектонічна зброя [Електронний ресурс] https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A2%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%B6%D0%B8%D0%B5

2. Камчатку розірвало ядерним вибухом. [Електронний ресурс] https://www.youtube.com/watch?v=hQPqmPG6Tp8

3. Рвонув ядерний флот рф. [Електронний ресурс] https://www.youtube.com/watch?v=6wTiikkK4lo

***Богомол Д. С.**, здобувач вищої освіти*

***Черепньов І. А.**, доцент, к.т.н., доцент*

Державний біотехнологічний університет, м. Харків

***Єрмаков О. І.**, старший науковий співробітник*

Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

ОЦІНКА СУЧАСНОГО СТАНУ З ІНФЕКЦІЙНИМИ ХВОРОБАМИ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ

Сьогодні з появою нових збудників інфекційних хвороб та виявленням у відомих мікроорганізмів нових біологічних властивостей інфекційна патологія набуває особливого значення. За визначенням Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), такі ситуації називаються надзвичайними (НС), а хвороби, що ними спричиняються – емерджентними хворобами. Так, для України існує значний ризик занесення та поширення транскордонних інфекційних захворювань, таких як бруцельоз, африканська й класична чума свиней та катаральна лихоманка овець (Німеччина, Італія),

бруцельозу свиней (Румунія), паратуберкульозу (Польща, Угорщина, Словаччина), лихоманки Західного Нілу та лихоманки Шмалленберга [1].

За даними Центру громадського моніторингу та контролю існує постійна загроза виникнення вогнищ епідемій як мінімум п'яти небезпечних інфекційних захворювань, а саме: пташиний грип, кір, поліомієліт, віспа мавп та хвороба Х (це умовне позначення гіпотетичної хвороби, яка потенційно може набути широкого поширення та призвести до пандемії) [2].

Авторами даних тез на підставі аналізу звітних документів ДСНС [3], складено ряд діаграм, які характеризують небезпеку НС природного походження на території України за період (2017-2025 рр.). Ці діаграми представлені на рис. 1 та 2.

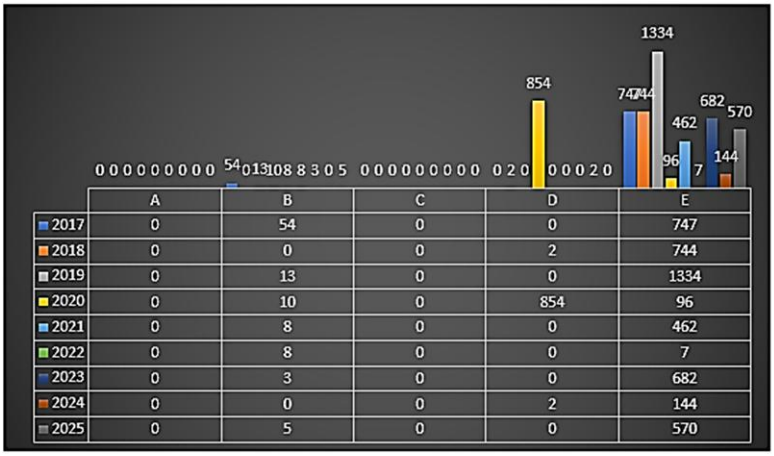


Рисунок 1 – Кількість постраждалих в НС природного походженні різних типів (2017-2025 рр.), де:

A – геологічні; B – метеорологічні;

C – гідрологічні поверхневих вод;

D – пов'язані з пожежами у природних екологічних системах;

E – Медико-біологічні НС.

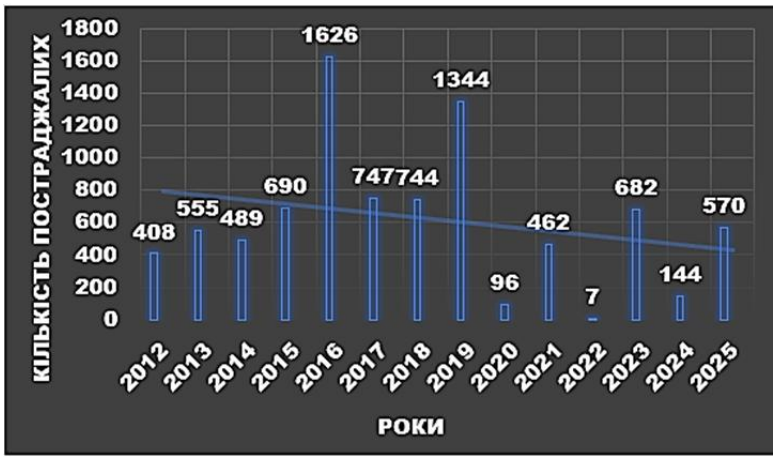


Рисунок 2 – Динаміка кількості людей які постраждали в МБНС на території України за період 2012-2025 років

На підставі даних діаграм можна зробити два висновки:

1. Протягом дев'яти років (2017-2025 рр..) найбільша кількість людей постраждала саме в наслідок медико-біологічних НС;

2. На території України намітився тренд деякого зниження кількості людей, які постраждали в МБНС.

Однак, на думку ряду фахівців дана тенденція викликана аж ніяк не позитивними змінами в системі охорони здоров'я. Зокрема, в [4] звернуто увагу, насамперед, на особливості епідемічного процесу вплинули такі соціальні та медичні чинники як скорочення числа спеціалізованих закладів/відділень (-38 %), стаціонарів (-28 %), ліжок (-60 %) та фахівців інфекційного профілю (-30-45 %), що спричинило зменшення доступності медичної допомоги інфекційним хворим; реорганізація системи санітарно-епідеміологічного нагляду та скорочення в 15 разів чисельності лікарів епідеміологічного профілю та їх підготовки, що послабило епідеміологічний контроль за інфекціями; запровадження жорстких протиепідемічних заходів під час пандемії COVID-19; скорочення чисельності населення (до 16-36 %) та зміни його статевовікової структури (переважання жінок, дітей і підлітків) внаслідок міграційних процесів; порушення логістики збору й передачі медико-статистичної інформації.

Тобто в Україні показники, які характеризують інфекційну захворюваність населення, знижуються. Водночас спостерігається розбіжність між фактичними та прогнозованими значеннями, причому фактичні показники перевищують прогнозні (на 1,6-6,3 % за різними методиками) до 2013 р. та навпаки, суттєво нижчі (до 10-29 %) у наступні роки, свідчать насамперед про проблему з виявленням та обліком інфекційних хворих.

Крім того, існує декілька негативних факторів, які діють не тільки на території України, а й у всьому світі, які підвищують небезпеку виникнення небезпечних інфекційних кишково-шлункових захворювань, а також ускладнюють їх лікування.

Має місце масова фальсифікація харчових продуктів. Результати аналізу перевірки якості окремих груп продовольчих товарів, наведені в [5], засвідчили, що споживання фальсифікованих харчових продуктів є відносно рівномірним у різних регіонах України (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати перевірки якості груп продовольчих товарів, що виконана Держспоживінспекцією України

Вид продовольчої групи товарів	Хлібо-булочні вироби	М'ясні вироби	Рибна продукція	Молочна продукція	Плодоовочева продукція	Дитяче харчування
Обсяг дослідженої вибірки, тонн	80	200	200	120	700	50
Частка виявленого браку, %	30	38	38	40	42	20

Згідно з результатами досліджень ВООЗ, близько 10,5 % усіх лікарських засобів, що застосовуються в країнах із низьким і середнім рівнем доходів, становлять фальсифіковану продукцію.

Це призводить до не тільки до невиправданої трати коштів пацієнтів і суб’єктів системи охорони здоров’я, а і до серйозних захворювань та смерті.

фактично відсутні. Зазначимо, що низька статистична достовірність цих даних пов’язана з відсутністю єдиної системи моніторингу обігу лікарських засобів [6].

Література:

1. Проблеми біобезпеки та біозахисту в Україні, які виникають за емерджентних інфекцій / А. О. Висоцький. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького. Сер. «Ветеринарні науки».* 2025, № 117. т 27. С. 74-79. doi:10.32718/nvlvet11710.

2. Інфекційні загрози 2025: п’ять хвороб, які можуть сколихнути світ. *Центр громадського моніторингу та контролю:* веб-сайт. URL: https://naglyad.org/uk/2025/01/06/infektsijni-zagrozi-2025-p-yat-hvorob-yaki-mozhut-skolihnuti-svit/ (дата звернення: 10.10. 2026).

3. Надзвичайні ситуації в Україні довідка за рік. *Державна служба України з надзвичайних ситуацій:* веб-сайт. URL: https://dsns.gov.ua/operational-information/nadzvicaini-situaciyi-v-ukrayini-2/dovidka-za-rik (дата звернення: 10.10. 2026).

4. Маркович І. Г., Маркович І. Ф. Інфекційні хвороби, епідемічні ризики, епідеміологічний нагляд в сучасних умовах України. *Інфекційні хвороби.* 2024. № 2. С. 4-12. doi.org/10.11603/1681-2727.2024.2.14608.

5. Держспоживінспекція забракувала 42 % перевіреного м'яса і 40 % молока. РБК-Україна: веб-сайт.URL: https://www.rbc.ua/ukr/news/gospotrebnadzor-zabrakoval-42-proverennogo-myasa-i-40-moloka-02102013120300 (дата звернення: 10.10. 2026).

6. Про схвалення Концепції реалізації державної політики щодо запобігання фальсифікації лікарських засобів та затвердження плану заходів з її реалізації: Розпорядження Кабінету Міністрів України від 03 квіт. 2019 р. № 301-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/301-2019-%D1%80#Text (дата звернення: 10.10. 2026).

***Лактіонов В. А.**, здобувач вищої освіти*
***Черепньов І. А.**, доцент, к.т.н., доцент*
Державний біотехнологічний університет, м. Харків
***Макогон О. А.**, доцент, к.т.н., доцент*
Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

ЕТАПИ СТАНОВЛЕННЯ І СУЧАСНИЙ СТАН СИСТЕМИ ЦИВІЛЬНОЇ ОБОРОНИ НА ТЕРИТОРІЇ СПОЛУЧЕНИХ ШТАТІВ АМЕРИКИ

Для США захист населення і територій від надзвичайних ситуацій (НС) різного походження вкрай актуальна, бо за схильністю до стихійних лих ця країна як правило займають перше місце в світі. На рис. 1 наведено дані за 2025 р. [1].

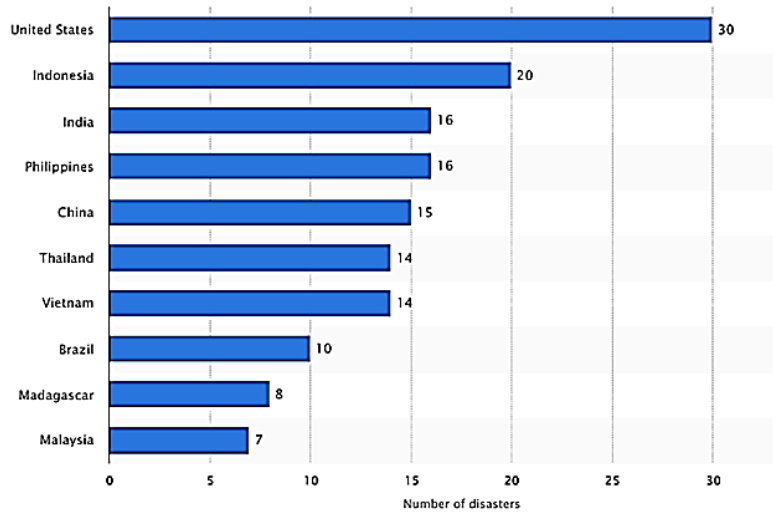


Рисунок 1 – Країни, в яких у 2025 році відбулось найбільше стихійних лих [1]

Як відомо, під час Першої Світової війни в США була створена Рада національної оборони. До його складу входили кілька секретарів Кабінету Міністрів, а також глави Збройних сил. Завданням цієї Ради було консультування президента та керівників виконавчих відомств щодо стратегічного розміщення промислових товарів та послуг для потенційного та майбутнього використання під час війни. Рада належним чином виконувала свої функції в роки війни, а потім була припинена в 1921 році. Через вісімнадцять років, у 1939 році, війна в Європі спонукала мерів міст США переглянути плани ЦО [2]. У 1940 році президент Франклін Д. Рузвельт, заснував Управління з НС при Адміністрації президента. Серед завдань, які були покладені на це управління, було підтримання зв'язку між президентом та Радою національної оборони, яку Рузвельт відродив приблизно через три дні. Він доручив Раді координувати національну оборонну програму. Саме в цей період було засновано підрозділ державного та місцевого співробітництва, який став відповідальним за різні функції в надзвичайних ситуаціях, в тому числі в 1940 році за місцевий Протипожежний захист, оскільки повітряні бомбардування в лондонському стилі розглядалися як реальна загроза території США. Рузвельт підготував Указ про створення «Міністерства внутрішньої оборони» (Department of Homeland Defense), який незабаром був реалізований, але під остаточною назвою «Управління внутрішньої оборони». (Office of Civilian Defense, OCD). Він наділив ОСД повноваженнями щодо задоволення широкого спектру потреб, включаючи захист цивільного населення, підтримку морального духу та заохочення участі добровольців в обороні. ЦО була важливою частиною життя США під час Другої світової війни. Однак, коли війна закінчилася, зусилля ЦО стали млявими. В же в червні 1945 року, відразу після війни, президент Трумен скасував OCD. У політико-адміністративному плані склалася думка, що захист громадян – це в першу чергу завдання Штатів і місцевої влади, а не федерального центру. Через це не склалося стійкої

федеральної системи, яка могла б підтримувати активність програм. Навіть коли пізніше, на тлі початку холодної війни, спроби відродити цивільну оборону робилися (наприклад, в 1950 році прийняли Федеральний закон Про ЦО і створили Федеральну адміністрацію ЦО, (FCDA), Конгрес часто істотно урізував запитувані бюджети. Політики та законодавці воліли спрямовувати кошти на військові та дипломатичні програми, які могли б запобігти конфлікту, а не на довгострокові програми захисту населення. Але вже в кінці 1940-х-1950-х роках, після того як СРСР випробував власну ядерну зброю, програми по ЦО знову активізувалися. В [2] дана характеристика зусиллям, які робилися в США в рамках заходів по ЦО в період 1950-2000 рр.. з розбивкою по десятиліттях, а саме:

— 1960-ті: «укриття від радіоактивних опадів»: пом'якшення наслідків випадання радіоактивних опадів у передмістях;

— 1970-ті: «У чому сенс?»: зниження політичної підтримки;

— 1980-ті: «Усі небезпеки»: планування надзвичайних ситуацій не приділяє особливої уваги ядерній зброї;

— 1990-ті: «Слава богу, з цим покінчено»: Цивільна оборона як пережиток холодної війни / об'єкт насмішок;

— 2000-ті: «Вісь зла»: боротьба з ядерним тероризмом/погрозами держав-ізгоїв.

1960-ті та початок 70-х років призвели до масових стихійних лих, які вимагали масштабних федеральних заходів реагування та відновлювальних робіт з боку Федерального управління з питань стихійних лих, створеного в рамках Міністерства житлового будівництва та містобудування (HUD). Ураган Карла обрушився в 1962 році, ураган Бетсі — у 1965 році, ураган Камілла – у 1969 році і ураган Агнес – у 1972 році. Землетрус на Алясці стався у 1964 році, а землетрус у Сан-Фернандо сколихнув Південну Каліфорнію у 1971 році. Ці заходи дозволили привернути увагу до проблеми стихійних лих і призвели до посилення законодавства. У 1968 р.

Національний закон Про страхування від повені запропонував власникам будинків нові засоби захисту від повені, а у 1974 р. Закон про ліквідацію наслідків стихійних лих чітко регулював процес президентських декларацій про ліквідацію наслідків стихійних лих. Однак заходи з НС та ліквідації наслідків стихійних лих все ще були розрізненими. Коли до стихійних лих додалися небезпеки, пов'язані з атомними електростанціями та транспортуванням небезпечних речовин, понад 100 федеральних агентств брали участь у деяких аспектах стихійних лих, небезпек та надзвичайних ситуацій. На державному та місцевому рівнях існувало багато паралельних програм та стратегій, що ускладнювало федеральні зусилля з ліквідації наслідків стихійних лих. Указом президента Картера від 1979 року багато окремих функцій, пов'язаних із стихійними лихами, були передані Федеральному агентству з надзвичайних ситуацій (FEMA). Серед інших агентств, FEMA поглинула Федеральне управління страхування, Національне управління з питань запобігання та боротьби з пожежами, Національну програму готовності населення до погодних умов, Федеральне агентство з питань готовності при управлінні загальних служб та Федеральне управління з надання допомоги у разі стихійних лих. Функції ЦО також були передані новому агентству від Агентства цивільної готовності МО [3].

Основні напрямки дій FEMA в умовах НС [4]:

Перед стихійним лихом FEMA допомагає громадам та особам підготуватися до очікуваного стихійного лиха шляхом регулярного навчання, залучення та освіти, щоб державні та місцеві чиновники були готові впоратися з цією подією, евакуювати людей та забезпечити максимальну безпеку населення в складних умовах.

Під час стихійного лиха, якщо шкода є достатньо значною, щоб претендувати на федеральну допомогу, губернатор може звернутися за декларацією президента про ліквідацію наслідків стихійного лиха. Як тільки чинний президент схвалює декларацію про ліквідацію наслідків стихійного

лиха, FEMA узгоджує з місцевими керівниками та керівниками штату надання необхідної допомоги для підтримки зусиль з відновлення.

Після стихійного лиха FEMA все ще готова надати державну та приватну допомогу у відновленні. FEMA часто співпрацює з місцевими лідерами у розробці програми відновлення, щоб громади могли якомога швидше отримати фізичну та фінансову підтримку та повернутися до нормальної роботи.

Література:

1. Countries with the most natural disasters in 2025. *Statista*: веб-сайт. URL: https://www.statista.com/statistics/269652/countries-with-the-most-natural-disasters/ (дата звернення: 10.10. 2026).

2. Alfassa S. The Evolution of American Civilian Defense into Modern Emergency Management. URL: https://nyc-arecs.org/cd-em.pdf (дата звернення: 10. 10. 2026).

3. Gonzalez A. Organizational Study of the Federal Emergency Management Agency (March 28, 2010). Available at SSRN: https://ssrn.com/abstract=1579746 doi.org/10.2139/ssrn.1579746.

4. What Does FEMA Do? American Rivers: веб-сайт. URL: https://www.americanrivers.org/2025/12/what-does-fema-do/ (дата звернення: 10.10. 2026).

***Ткачова С. В.**, здобувач вищої освіти*
***Черепньов І. А.**, доцент, к.т.н., доцент*
Державний біотехнологічний університет, м. Харків
***Ткачова О. І.**, старший науковий співробітник*
Військовий інститут танкових військ Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

ОЦІНКА СУЧАСНОГО СТАНУ ГІДРОДИНАМІЧНИХ СПОРУД У СВІТІ

Станом на початок XXI ст. у світі в результаті технічного зарегулювання стоку річок за допомогою гребель було створено більш як 30 тис. штучних водосховищ загальним об'ємом 1 млн. м³, що спричинило затоплення 0,25 % території суходолу. Більшість водосховищ споруджено з метою розвитку гідроенергетики, іригації, технічного та питного водопостачання, а також для поліпшення роботи водного транспорту. Загальна кількість великих гребель (понад 15 м заввишки), побудованих у XX ст., сягає 46 тисяч. У п'ятірці лідерів, кількість великих гребель розподілене наступним чином: Китай – 23841; США – 9263; Індія – 4407; Японія – 3130; Бразилія – 1365 [1].

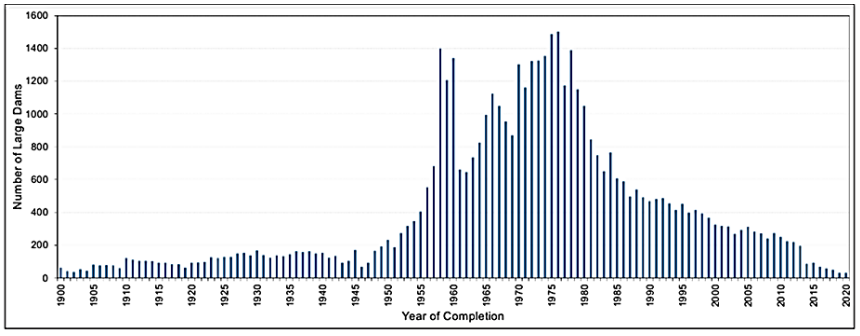


Рисунок 1 – Щорічне будівництво великих дамб у всьому світі з 1900 року

Як видно з рис. 1 будівництво великих дамб різко зросло в середині 20 століття і досягло свого піку в 1960-70-х роках, особливо в Азії, Європі та

Північній Америці, тоді як в Африці пік будівництва припав на 1980-ті роки. На рис. 2 представлено розподіл дамб у різних регіонах світу за їх середнім віком. Середній вік був обраний як показник центральної тенденції, щоб мінімізувати вплив викидів (наприклад, у Чехії та Японії можна знайти кілька великих дамб, що перевищують п'ять століть). Середній вік великих дамб на більшій частині Європи та Північної Америки вищий і становить від 50 до 100 років.

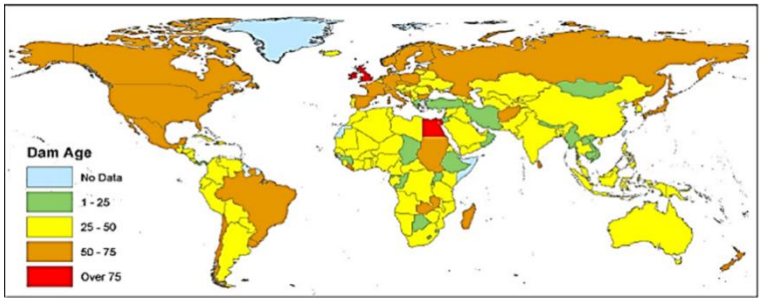


Рисунок 2 – Середній вік великих гребель в розбивці по країнах [1]

Старіюча інфраструктура водосховищ поступово перетворюється на серйозну проблему глобального розвитку. Вік тисяч великих дамб, побудованих в середині минулого століття, вже перевищив або незабаром перевищить 50 років – нижню межу проектного терміну служби дамб, – і багато з них наближаються до 100 років. Як результат, вони вимагатимуть більших витрат на технічне обслуговування, одночасно зменшуючи ефективну функціональність та створюючи загрози для навколишнього середовища та безпеки людини. У доповіді під назвою «Старіюча водна інфраструктура: виникаючий глобальний ризик» складеному канадським інститутом водних ресурсів, навколишнього середовища та здоров'я при Університеті ООН наводяться наступні дані: «до 2050 року більшість людей на Землі житимуть нижче за течією від десятків тисяч великих гребель, побудованих в 20 столітті, багато з яких вже працюють на проектному терміні експлуатації або після його закінчення» [2].

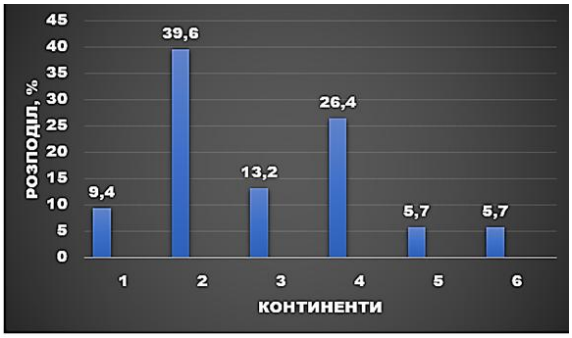


Рисунок 3 – Географічний розподіл аварій на греблях в %, де:
1 – Африка; 2 – Азія; 3 – Європа; 4 – Північна Америка;
5 – Південна Америка; 6 – Австралія

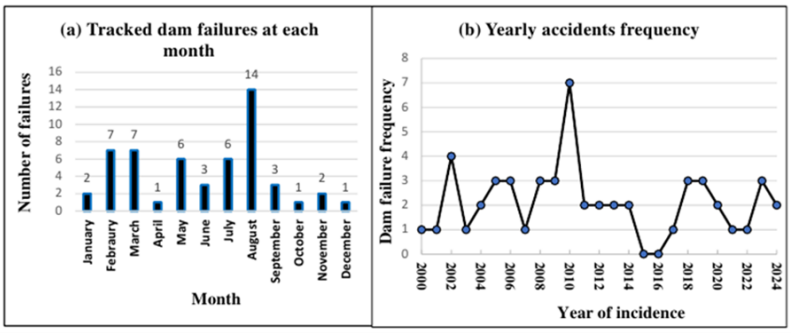


Рисунок 4 (а, б) – (a) щомісячна частота руйнування греблі;
(b) щорічне руйнування греблі [3]

Як видно з рис . 4a: три місяці з найбільшою кількістю аварій на дамбах з 2000 по середину 2024 року – це серпень, лютий та березень. І навпаки, майже половина року, з вересня по січень, припадає на період з найменшою кількістю аварій на греблях. Аварії на дамбах протягом цих п'яти місяців відбувалися в основному через технічні та антропогенні фактори, що призвело до катастрофи. На щорічній основі, як показано на рис. 4 (b), частота аварій гребель залишається відносно стабільною, за винятком 2010 року. Однак, з роками спостерігається тенденція до зниження порівняно з попереднім століттям. При порівнянні рівня аварійності гребель у 1976-2000 роках з рівнем аварійності в 2000-2024 роках спостерігається зниження на 0,064 %. Це зниження можна пояснити підвищенням обізнаності

в результаті уроків, отриманих від попередніх аварій на дамбах. Спостережувані результати свідчать про те, що наслідки зміни клімату все ще відчуваються, але накопичення знань, щоб уникнути більшої кількості невдач, значною мірою сприяло протягом багатьох років.

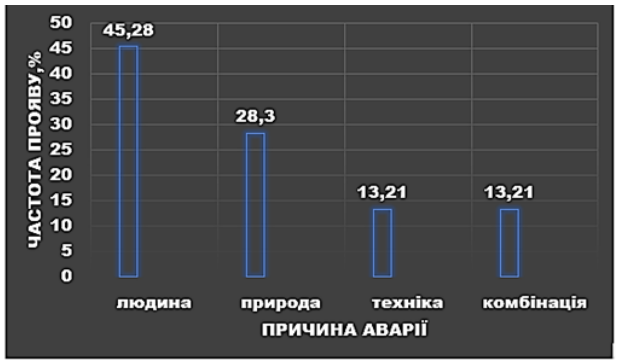


Рисунок 5 – Загальна класифікація причин (факторів) руйнування греблі [3]

Ефективне управління ризиками для інфраструктури має вирішальне значення для зменшення вразливості до структурних збоїв.

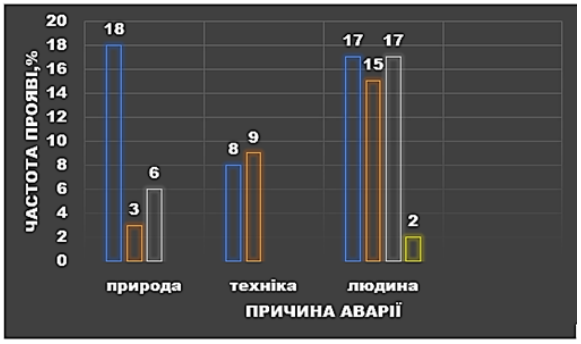


Рисунок 6 – Детальна класифікація причин руйнування греблі, де:
Природа: метрологічні 18 %; кліматологічні 3 % геофізичні 6 %.
Техніка: фізичні проблеми 8 %; експлуатаційні проблеми 9 %.
Людина: неефективне управління 17 %;
недоліки проектування і конструкції 15 %; проблеми з технічним обслуговуванням 17 %; проблеми з перевіркою 2 %. [3]

Ключовим принципом управління ризиками є визнання того, що збої в критичній інфраструктурі, такі як дамби, які є предметом цього дослідження, часто передбачувані були відзначені сезонні закономірності в руйнуванні дамб: серпень був найбільш поширеним місяцем для інцидентів в Північній півкулі, а в Південній півкулі аварії частіше відбувалися з листопада по лютий, що збігається з місцевим літнім сезоном або сезоном дощів.

Так, загальне зниження відмов було очевидним порівняно з попереднім століттям, можливо, через зменшення обсягів будівництва дамб та вдосконалення інженерних методів [3].

Література:

1. Ageing Water Storage Infrastructure: An Emerging Global Risk. *ReliefWeb:* веб-сайт. URL: https://reliefweb.int/report/world/ageing-water-storage-infrastructure-emerging-global-risk (дата звернення: 10.10. 2026).

2. Ageing dams in India, U.S., other nations pose growing threat: UN report. *The Hindu:* веб-сайт.URL: https://www.thehindu.com/news/international/ageing-dams-in-india-us-other-nations-pose-growing-threat-un-report/article33648907.ece (дата звернення: 10.10. 2026).

3. Nasser R., Tzioutzios D., Liu Y. Statistical Analysis of Global Dam Accidents in the 21st Century: A Focus on Common Features and Causes. *Water Resources Management.* 2025. Vol. 39. P. 6493-6516. doi.org/10.21203/rs.3.rs-5361886/v1.

***Шаповаленко Оксана**, ст. гр. А-51-26*
*Науковий керівник: **Кравцов Михайло**, к.т.н., доцент кафедри МБЖД*
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

ЗАХОДИ БЕЗПЕКИ ПРИ ВИКОНАННІ ПІРОТЕХНІЧНИХ РОБІТ ПІД ЧАС ЛІКВІДАЦІЇ АВАРІЙ

Загальні положення та організаційно-правові підстави. Розробка та проведення вибухових і піротехнічних робіт під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій (НС) здійснюються у суворій відповідності до Кодексу цивільного захисту України, національних стандартів, правил з охорони праці та спеціальних галузевих інструкцій. До безпосереднього проведення підривних робіт залучається виключно спеціалізований персонал (піротехніки, сапери, вибухотехніки), який пройшов відповідну професійну підготовку, атестацію та має діючі посвідчення на право керівництва або проведення вибухових робіт. На весь період ліквідації аварії призначається керівник вибухових робіт, чиї розпорядження є обов'язковими для виконання всіма підрозділами, залученими у зоні проведення операції. Перед виходом на завдання персонал проходить обов'язковий передзмінний медичний огляд та оцінку психофізіологічної готовності до виконання робіт в умовах підвищеного ризику [1].

Інженерна та піротехнічна розвідка місця аварії. Проведення розвідки здійснюється із застосуванням спеціального обладнання (металошукачі, газоаналізатори, тепловізори, безпілотні літальні апарати) для визначення точності оцінки обсягів руйнувань та виявлення прихованих загрози. Обов'язкова ідентифікація наявності нездетонованих боєприпасів, вторинних вибухонебезпечних предметів, витоків вибухонебезпечних чи токсичних газів, легкозаймистих рідин та загрози раптового обвалення несучих елементів. Оцінка матеріалу та стану конструкцій (бетон, метал, залізобетон,

крига), що підлягають підриву, для коректного розрахунку маси зарядів та вибору оптимальних засобів підривання. Постійний контроль швидкості та напрямку вітру, вологості повітря, температури навколишнього середовища та атмосферного тиску для розрахунку шляхів поширення вибухової хвилі і можливого витоку шкідливих речовин. Прокладання безпечних маршрутів підходу піротехнічних груп до місця закладання зарядів та встановлення напрямків екстреного відходу персоналу. Складання детальної картосхеми місця проведення робіт із позначенням виявлених небезпечних предметів, місць майбутньої закладки зарядів та зон розміщення постів охорони [2, 3].

Зонування та організація огородження небезпечних територій. Розміри небезпечної зони визначаються за найбільшою із відстаней, розрахованих за факторами дії повітряної вибухової хвилі, розльоту осколків (шматків підриваного матеріалу) та сейсмічної дії вибуху. Повна ізоляція небезпечної зони від проникнення сторонніх осіб, цивільного транспорту та домашніх тварин. Виставлення постів охорони на всіх підходах та під'їздах. По периметру небезпечної зони встановлюються стандартні покажчики та знаки безпеки з написами: «НЕБЕЗПЕЧНА ЗОНА», «ПРОХІД ТА ПРОЇЗД ЗАБОРОНЕНО», «ВИБУХОВІ РОБОТИ». Інформування підрозділів ДСНС, Національної поліції, медичної служби та органів місцевої влади про час, межі та тривалість проведення підривних робіт. Перевірка відсутності людей у будівлях, спорудах чи на відкритій місцевості, що потрапляють у розраховану небезпечну зону, перед наданням дозволу на закладання зарядів. Обладнання безпечних бліндажів, укриттів або використання спеціально броньованого транспорту для розміщення підривників та керівника робіт на час здійснення вибуху [4].

Вимоги до транспортування, збереження та підготовки вибухових матеріалів. Перевезення вибухових речовин (ВР) та засобів підривання (ЗП) здійснюється спеціально обладнаними автомобілями з відповідними допусками, заземленням, засобами пожежогасіння та маркуванням. Суворе

дотримання вимог щодо роздільного перевезення капсулів-детонаторів та самих вибухових речовин, якщо це не передбачено конструкцією спеціальних контейнерів. Організація тимчасових пунктів зберігання ВР під цілодобовою охороною, у захищеному від вологи, прямих сонячних променів та джерел відкритого вогню місці. Огляд упаковки, перевірка маркування та зовнішнього стану засобів підривання перед використанням. Категорично забороняється застосування ВР чи ЗП зі слідами пошкодження, зволоження або закінченим терміном придатності. Виготовлення бойових патронів та збирання вибухових мереж виконується безпосередньо перед застосуванням у спеціально відведеному безпечному місці за вказівкою керівника робіт. Ведення суворого обліку витрати ВР і ЗП із записом у журналі обліку та складанням акта про фактичні витрати після закінчення робіт. Усі невикористані матеріали підлягають обов'язковому поверненню на склад [5, 6].

Технологічні заходи безпеки під час закладання зарядів та вибухових мереж. У момент підготовки та закладання зарядів у небезпечній зоні перебувають лише ті фахівці, які безпосередньо виконують цю операцію. Використання інструменту з кольорових металів (мідь, латунь, алюміній) або спеціальних сплавів, що унеможливлює утворення іскор під час механічної роботи. Перевага надається електромеханічному чи неелектричному (хвилеводному) способам підривання. Застосування вогневого способу підривання під час ліквідації аварій дозволяється лише у виняткових випадках за наявності окремого обґрунтування. При використанні електропідривання обов'язково вимірюється наявність блукаючих струмів та електромагнітних полів. Кабельні мережі з'єднуються лише перед самим вибухом. Прокладання детонуючих шнурів чи електромереж здійснюється без натягу, заломів та захищається від можливих механічних пошкоджень у разі падіння конструкцій. Обов'язкова перевірка опору вибухово-провідної

мережі за допомогою вибухозахищених приладів (омметрів) з безпечної відстані перед підключенням до джерела струму [7].

Забезпечення зв'язку, сигналізації та порядок проведення вибуху. Встановлення та доведення до всього персоналу чіткого порядку подачі звукових (повітряна сирена, сигнальний ріжок) та світлових сигналів: перший сигнал – попереджувальний: виставляються пости охорони, персонал виводиться у безпечну зону. Другий сигнал – бойовий: проводиться безпосередня подача імпульсу для вибуху. Третій сигнал – відбій: подається після огляду місця вибуху керівником робіт та підтвердження безпеки. Надійність радіозв'язку: забезпечення дубльованими каналами зв'язку між керівником робіт, підривниками, постами охорони та аварійно-рятувальними бригадами. Заборона використання сторонніх пристроїв: прибезпечення використання мобільних телефонів та радіостанцій неналежної потужності безпосередньо біля електродетонаторів для запобігання передчасному спрацюванню. Перевірка готовності всіх постів охорони, отримання письмових чи чітких радіозвітів про повну очистку зони, підключення підривного приладу. Проведення підриву виключно за особистою командою керівника вибухових робіт [8].

Заходи безпеки після вибуху та при виникненні відмов. Доступ персоналу до місця вибуху дозволяється не раніше ніж через 15 хвилин після проведення вибуху (або після повного провітрювання та розсіювання пилогазової хмари). Керівник робіт разом із досвідченим піротехніком особисто оглядають місце проведення підриву на предмет виявлення нездетонованих зарядів, залишкових загрози чи осередків займання. Призначення підвищеного часу очікування (не менше 30 хвилин для електропідривання та до 1 години при вогневому способі). Повторна подача сигналів небезпеки та розширення периметру охорони. Ліквідація відмовлених зарядів виключно у спосіб, передбачений інструкцією (підрив додатковим зарядом поруч, вимивання водою тощо). Забороняється

витягувати детонатори з відмов кричущими зусиллями або розскобливати вибухову речовину. Вимірювання концентрації токсичних продуктів вибуху (оксид вуглецю, оксиди азоту) в закритих приміщеннях або завалені до початку аварійно-рятувальних робіт. Оцінка стану напівзруйнованих елементів будівель чи ґрунту після вибуху перед допуском техніки або рятувальників [9].

Засоби індивідуального захисту та екологічна безпека. Забезпечення персоналу спеціальними захисними костюмами (при необхідності – бронежилетами та вибухозахисними шоломами), антистатичним взуттям, рукавицями, засобами захисту органів зору та слуху. Використання ізолюючих або фільтруючих протигазів, респіраторів у разі загрози виділення токсичних газів або високого рівня запиленості після вибуху. Проведення обробки техніки та інструментів після проведення робіт в умовах можливого хімічного чи радіаційного забруднення аварійного об'єкта [10].

Література:

1. ДСТУ 8996:2020. *Вибухові роботи. Правила безпеки під час проведення вибухових робіт.* – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2021. – 74 с.

2. Правила охорони праці під час оброблення матеріалів вибухом та проведення вибухових робіт. Затверджено наказом Міністерства розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України від 29.01.2021 № 162.

3. Методичні рекомендації щодо проведення аварійно-рятувальних та інших невідкладних робіт під час ліквідації наслідків руйнувань будівель і споруд. – К.: ДСНС України, 2026. – 42 с.

4. Безугла Ю. В., Поспєлов Б. Б., Рибка Є. О. *Оцінка та прогнозування ризиків виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру під час проведення вибухових робіт.* // Проблеми надзвичайних ситуацій. – 2024. – Вип. 39. – С. 112-125.

5. Бойко В. В., Кравцов М. М. *Особливості піротехнічного забезпечення під час ліквідації наслідків надзвичайних ситуацій та техногенних аварій.* // Збірник наукових праць НУЦЗУ. – 2023. – № 2 (18). – С. 45-54.

6. Гула Л. В., Непша О. В., Зав'ялова Т. В. *Заходи безпеки при підриві нестабільних будівельних конструкцій у зоні аварійно-рятувальних робіт.* // Науковий вісник цивільного захисту. – 2025. – № 1. – С. 78-89.

7. Козар Ю. О., Луценко Т. М. *Моніторинг та зниження вторинних факторів вибуху при демонтажу аварійних об'єктів.* // Вісник КрНУ ім. Михайла Остроградського. – 2022. – Вип. 4 (135). – С. 101-108.

8. Мисковець І. А., Полковниченко Д. В. *Управління ризиками та безпека персоналу при проведенні спеціальних вибухових робіт в умовах завалів.* // Цивільна безпека та інженерний захист. – 2024. – № 3. – С. 33-41.

9. Прохорова Л. О., Левада О. М., Андронов В. А. *Застосування неелектричних систем підривання для забезпечення безпеки піротехнічних робіт при ліквідації НС.* // Пожежна безпека: теорія і практика. – 2023. – № 32. – С. 15-24.

10. Чернуха А. О., Гарбуз С. В. *Методологія розрахунку небезпечних зон та оцінка сейсмічної дії вибуху під час ліквідації техногенних аварій.* // Екологічна безпека та природокористування. – 2025. – № 2 (46). – С. 61-72.

Матеріали Всеукраїнської науково-практичної Інтернет-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених

«Метрологічні аспекти прийняття рішень в умовах роботи на техногенно небезпечних об’єктах»

Відповідальність за достовірність наведених в матеріалах даних несуть автори публікацій.
Точка зору редколегії не завжди збігається з позицією авторів.

3 листопада 2026 р.
м. Харків, Україна

204