

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 2025 році (Посвідчення УкрІНТЕІ № 799 від 09 грудня 2024 року)

**4 листопада 2025 р.
м. Харків, Україна**

Організаційний комітет конференції

Богомолів Віктор Олександрович	- голова організаційного комітету, ректор ХНАДУ (м. Харків), професор
Дмитрієв Ілля Андрійович	- заступник ректора з наукової роботи ХНАДУ (м. Харків), професор
Єфименко Олександр Володимирович	- декан механічного факультету ХНАДУ (м. Харків), професор
Богатов Олег Ігоревич	- відповідальний секретар конференції, завідувач кафедри метрології та безпеки життєдіяльності ХНАДУ (м. Харків), доцент

ЗМІСТ

	Стор.
Секція 1 Вимірювальні інформаційні технології на техногенно небезпечних об'єктах	
Ганус А. В., Роянов О. М. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ СИСТЕМИ ЗАГАЗОВАНOSTІ РЕЗЕРВУАРІВ ЗБЕРІГАННЯ ПАЛИВА	7
Дьомінов Д. І. ВИКОРИСТАННЯ ЛОКАЛЬНОЇ КОРЕЛЯЦІЇ МІЖ СИГНАЛАМИ У ВІКНАХ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ ШВИДКИХ ЗМІНЮВАНЬ ПАРАМЕТРІВ СИГНАЛУ	10
Клягін П. В. ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ КОНТУРІВ ОБ'ЄКТІВ В МАТРИЦІ ВІДЕОКАМЕРИ НА ОСНОВІ ОЦІНКИ ЕВКЛІДОВОЇ ВІДСТАНІ МІЖ РЯДКАМИ І СТОВПЦЯМИ ПІДМАТРИЦЬ	12
Лабур Р. Ю., Богатов О. І. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ ІЗ ГЕТЕРОГЕННИМИ ДАТЧИКАМИ	14
Масляник Д. К., Петрукович Д. Є. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ	17
Перевозник П. О., Медведовська Я. С. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ	21
Петровський І. М., Медведовська Я. С. ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АЛГОРИТМІВ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРИ НИЗЬКОМУ СПІВВІДНОШЕННІ СИГНАЛ/ШУМ	25
Сокач А. І., Кравцов М. М. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ПРОГНОЗУВАННЯ КЛІМАТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА МАШИНОБУДІВНОМУ ПІДПРИЄМСТВІ	29
Філатов Є. А., Кравцов М. М. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ ПОВІТРЯ У ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОМУ ЦЕХУ МАШИНОБУДІВНОГО ПІДПРИЄМСТВА	34
Хоменко Ю. С. МОДЕЛЬ РОЗПІЗНАВАННЯ НАЗЕМНИХ ОРІЄНТИРІВ АВТОНОМНИМИ МОБІЛЬНИМИ РОБОТАМИ З ВИКОРИСТАННЯМ ФРАКТАЛЬНОЇ РОЗМІРНОСТІ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ ДОСТОВІРНОСТІ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ	39
Шевченко Я. С., Богатов О. І. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРОГНОЗУВАННЯ МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ У ДИНАМІЧНОМУ РЕЖИМІ	42

Секція 2 Пристрої і методи вимірювання та контролю параметрів потенційно небезпечних процесів. Метрологічне забезпечення безпеки життєдіяльності	
Бугайчук Н. Р., Тичков В. В., Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В. ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИХРОСТРУМОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ НА КОНВЕЄРНИХ ЛІНІЯХ	47
В'яла О. А., Коваль А. О. АДАПТИВНА ФІЛЬТРАЦІЯ ШУМІВ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ	53
Коршун Є. А., Тичков В. В., Гальченко В. Я., Трембовецька Р. В. ПРОЕКТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОНТРОЛЮ ВОДНИХ РЕСУРСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІОНСЕЛЕКТИВНИХ СЕНСОРІВ	58
Рудаков С. В., Старченко М. В. МЕТОДИКА ВИЯВЛЕННЯ МІСЦЬ ПОШКОДЖЕННЯ КАБЕЛЬНИХ ВИРОБІВ НА ЕНЕРГЕТИЧНИХ КОМПЛЕКСАХ	62
Тичков Д. В., Бондаренко М. О. ПОБУДОВИ, АНАЛІЗ ТА ВИБІР ОПТИМАЛЬНИХ РЕГРЕСІЙНИХ МОДЕЛЕЙ ДОСЛІДЖЕНЬ В СЕРЕДОВИЩІ DATA MINING WORKSPACES	67
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	71
Коваль Д. О., Штих С. О., Коваль А. О. ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА ТЕХНОЛОГІЯ ОЦІНЮВАННЯ ТА КОРЕКЦІЇ ПОХИБОК ЮСТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ	76
Секція 3 Проблемні питання прийняття рішень	
Бажан Є. С., Грайворонська І. В. ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАХИЩЕНОСТІ ДАНИХ У ПРОЦЕСІ ПРОМИСЛОВОЇ ОБРОБКИ	80
Блажко С. С., Олійник Л. Г., Коваль О. А. МЕТОД ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ В МУЛЬТИСЕНСОРНІЙ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІЙ СИСТЕМІ ТИСКУ	83
Стрелець В. В., Рябов О. Д., Коваль О. А. МЕТОД ПОЯСНЮВАЛЬНОГО ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ДЛЯ ІНТЕРПРЕТАЦІЇ РЕЗУЛЬТАТІВ ОБРОБКИ ДАНИХ ВИМІРЮВАНЬ	87
Ус М. О., Грайворонська І. В. ЗАСТОСУВАННЯ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ОБРОБКИ ДАНИХ	91
Швидкий М. О., Роянов О. М. СПОСОБИ ОБРОБКИ ДАНИХ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРОМИСЛОВИХ ЗОН	93

Шнурко І. О., Петрукович Д. Є. ПРОГНОЗУВАННЯ ДЕГРАДАЦІЇ СЕНСОРІВ ТЕМПЕРАТУРИ В СИСТЕМІ ДОРОЖНЬОЇ МАШИНИ	96
Ялова К. А. ПРОБЛЕМНІ ПИТАННЯ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ У АІ-АСИСТОВАНИЙ ДІАГНОСТИЦІ ЗАХВОРЮВАНЬ ШКІРИ	100
Секція 4 Ліквідація наслідків аварій на техногенно небезпечних об'єктах	
Богомол Д. С., Черепньов І. А., Пісня Л. А. АНАЛІЗ НАСЛІДКІВ НЕГАТИВНОГО ВПЛИВУ ПЕСТИЦИДІВ НА ПРАЦІВНИКІВ СІЛЬСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА	107
Волчанов Д. В., Кравцов М. М. ЕКОЛОГІЧНІ ІННОВАЦІЇ В АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ: ШЛЯХ ДО ЗМЕНШЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ	111
Курилюк О. М. ЛІКВІДАЦІЯ НАСЛІДКІВ АВАРІЙ НА ТЕХНОГЕННО НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТАХ ЗА ДОПОМОГОЮ АВТОНОМНОЇ МОБІЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОЧИЩЕННЯ ВОДИ КОМБІНОВАНОЇ ДІЇ	114
Нечаус А. О., Кравцов М. М. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ДАТЧИКІВ ВИЗНАЧЕННЯ ЯКОСТІ ПОВІТРЯ	117
Попко С. О., Черепньов І. А., Пісня Л. А. СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКА ТЕХНІКА ЯК ПРИЧИНА ПОЖЕЖ В АГРОПРОМИСЛОВОМУ КОМПЛЕКСІ	123
Сальник О. В., Табуненко В. О. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ВІЙСЬКОВИХ ОБ'ЄКТІВ В УМОВАХ БОЙОВИХ ДІЙ	126
Толмачов Д. М., Кравцов М. М. ЕКОЛОГІЧНІ ІННОВАЦІЇ В АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ: ШЛЯХ ДО ЗМЕНШЕННЯ ШКІДЛИВИХ ВИКИДІВ	131
Яровий О. В., Кравцов М. М. ЗАСТОСУВАННЯ ДРОНІВ І РОБОТОТЕХНІКИ ПІД ЧАС ЛІКВІДАЦІЇ НАСЛІДКІВ АВАРІЙ НА ПРОМИСЛОВИХ ОБ'ЄКТАХ	135

Бугайчук Н. Р., аспірант
Тичков В. В., к.т.н., доцент
Гальченко В. Я., д.т.н., професор
Трембовецька Р. В., д.т.н., професор
кафедра приладобудування, мехатроніки
та комп'ютеризованих технологій,
Черкаський державний технологічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИХРОСТРУМОВИХ ВИМІРЮВАНЬ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛЕВИХ ВИРОБІВ НА КОНВЕЄРНИХ ЛІНІЯХ

Вимірювання магнітної проникності смуг феромагнітного прокату вихрострумним методом є доволі непростю метрологічною операцією, ефективність виконання якої значною мірою залежить від позбавлення сигналів перетворювачів перехресної чутливості до низки впливових на їх формування параметрів, зокрема локальних варіацій електропровідності, змін величини повітряного зазору та товщини об'єктів випробувань. В ряді випадків, коли товщина прокату є умовно значною, тобто перевищує глибину проникнення електромагнітного поля в матеріал в п'ять і більше разів, цим фактором можна нехтувати. Проте, якщо металева смуга перебуває у русі, тобто спостерігається її переміщення зі швидкістю v відносно вимірювального перетворювача, то до вказаних факторів додається ще один, пов'язаний із нестабільністю швидкості руху прокату. Отже, забезпечення прийнятних інформативно «чистих» вихідних сигналів вихрострумних перетворювачів (ВСП), бажано вільних від перешкоджаючих впливів без їх фактичного усунення та функціонально залежних тільки переважно від проникності матеріалу, є актуальним науково-прикладним завданням,

виконання якого суттєво покращує умови здійснення точніших вимірювань магнітної проникності металопрокату.

Робастне параметричне проектування накладних вихрострумових перетворювачів для вимірювання електрофізичних властивостей гарячекатаних кругів у потоці прокатного стану полягає в оптимізації конструктивних та функціональних параметрів перетворювачів для забезпечення стабільності та точності вимірювань в умовах високих температур, динамічного руху та механічних навантажень.

Основні аспекти проектування включають:

- Математичне моделювання вихрострумової взаємодії перетворювача з гарячекатаними кругами, враховуючи температурний вплив на електрофізичні властивості матеріалу

- Параметричний синтез геометрії котушок, частоти збудження та просторового розташування для мінімізації похибок за зміни температури й швидкості руху виробу

- Застосування методів оптимізації і робастних алгоритмів, які враховують варіабельність процесу прокатки та зовнішніх факторів, що впливають на сигнали вихрових струмів

- Формування критеріїв оптимальності, таких як максимальна чутливість, мінімальна похибка, стабільність вимірювань і тривала експлуатаційна надійність

В результаті, розробляються робастні вихрострумові перетворювачі, здатні здійснювати безперервний контроль провідності та магнітної проникності гарячекатаних кругів у реальному часі на прокатних лініях з високою точністю та надійністю, що забезпечує підвищення якості металопродукції.

Отже, **мета роботи** полягає у створенні на основі оптимізаційного алгоритму Тагучі методу робастного параметричного проектування вихрострумових вимірювачів магнітної проникності рухомої смуги

феромагнітного металопрокату, котрий забезпечує підвищення значень коефіцієнтів сигнал/шум SNR накладних трансформаторних перетворювачів з прямокутними ортогональними котушками та зменшує на стадії формування варіацію їх сигналів, яка обумовлена дією неконтрольованих перешкоджаючих факторів.

Задачу дослідження сформулюємо наступним чином: на стадії проектування трансформаторного накладного вихрострумowego перетворювача з прямокутними ортогональними котушками, призначеного для вимірювання магнітної проникності рухомого смугового феромагнітного металопрокату умовно значної товщини, необхідно знайти на основі методу робастного параметричного проектування Тагучі таку комбінацію його режимних та конструктивних параметрів, яка внаслідок складної нелінійної їх взаємодії реалізує максимально можливий коефіцієнт сигнал/шум разом із низькою дисперсією амплітуди вихідного сигналу, обумовленої дією перешкоджаючих впливів без їх усунення.

Загальна схема, яка демонструє повний план дослідження, представлена на рисунку 1. Вона містить перелік етапів алгоритму робастного параметричного проектування вихрострумових вимірювачів проникності з коротким описом їх суті та послідовності виконання. Перший з них полягає у створенні плану експериментів (DOE) Тагучі, який в свою чергу передбачає виконання декількох послідовних кроків: 1.1 - аналітичного аналізу фізичного процесу вимірювання магнітної проникності перетворювачем та визначення контрольованих та неконтрольованих впливових факторів, що обумовлюють формування сигналу. При цьому вважатимемо під неконтрольованими ті з них, котрі заважають вимірюванням, тобто є шумовими; 1.2 - для контрольованих параметрів вимірювача із каталогу [1] обирається, враховуючи кількість впливових факторів та прийнятих рівнів їх градації, відповідний ортогональний масив як складова створення плану експериментів Тагучі, визначаються границі інтервалів їх змін;

1.3 - аналогічні дії виконуються для неконтрольованих факторів;
1.4 - на цьому кроці передбачений вибір математичної моделі процесу вимірювання накладним ВСП, яка пов'язує між собою конструктивні та режимні параметри вимірювача, електрофізичні, геометричні та інші характеристики об'єкту вимірювань, а отже дозволяє обчислити моделюванням його вихідний сигнал, тобто електрорушійну силу (ЕРС) E .

Другий етап схеми також передбачає низку кроків: 2.1 - за створеним на першому етапі планом експериментів Тагучі, що містить згенеровані варіанти структур вимірювачів та можливі комбінації завод при вимірюваннях ними, відбувається визначення ЕРС перетворювача для кожного різновиду структури при всіх можливих різноманітних ансамблях шумових факторів; 2.2 - для кожного експерименту, обумовленого планом, за отриманими в п.2.1 ЕРС визначається значення показника SNR із врахуванням властивості «larger is better» [2].

Заключний третій етап загальної схеми містить наступні обчислення: 3.1 - враховуючи статистичні показники, серед яких середнє значення відношення сигнал/шум всіх контрольованих параметрів та окремо для кожного з них на всіх рівнях їх градацій, абсолютні похибки його середнього, виконується пошук оптимальних контрольованих параметрів вимірювача, що забезпечують максимально можливе відношення SNR; 3.2 - проведення підтверджувального чисельного експерименту щодо обчислення значення показника SNR, яке забезпечує отримана оптимальна конструкція, та переконанні у забезпеченні його максимального значення серед притаманних всім іншим структурам, котрі підлягали розгляду; 3.3 - застосування дисперсійного ANOVA-аналізу та оцінка за критерієм Фішера показників статистичної значущості впливу контрольованих параметрів на результативну ознаку у вигляді сигналу перетворювача. Отримана таким чином інформація враховується при формуванні вимог до точності

виготовлення структур перетворювачів та умов підтримки режиму їх функціонування.

В публікаціях [1, 2, 3, 4] можна більш широко ознайомитися із детальним описом кожного із етапів наведеного алгоритму в узагальненому вигляді.



Рисунок 1 – Загальна схема робастного параметричного проєктування вихрострумowego вимірювача магнітної проникності методом Тагучі

Всі дослідження в рамках цієї роботи проводилися в результаті комп'ютерних чисельних експериментів. Хоча в оригіналі заповнення плану експериментів Тагучі передбачає виконання фізичних вимірювань сигналів вимірювачів проникності, в цих дослідженнях відбір сигналів імітувався моделюванням за обраною математичною моделлю процесу вимірювань.

В дослідженні на прикладах накладних трансформаторних перетворювачів з прямокутними ортогональними котушками вихрострумowych вимірювачів магнітної проникності рухомого

ферромагнітного смугового прокату здійснено комп'ютерне робастне проектування на основі методу Тагучі.

Для реалізації запропонованого методу віднайдена оптимальна конструкція та параметри збудження вимірювача магнітної проникності, котрі мінімізують вплив неконтрольованих шумових факторів на етапі формування сигналу. При цьому встановлено, що оптимальна структура забезпечує максимально можливе значення показника сигнал/шум на рівні 7.1 дБ. Так приріст SNR, для найгіршої неоптимізованої конструкції складає 28.6 дБ, а для найкращої відповідно - 1.54 дБ. Такий приріст навіть при мінімальному його значенні дає збільшення рівня сигналу перетворювача приблизно на 15.4 %. Проте пошук найкращої із неоптимізованих конструкцій ВСП є, в свою чергу, нетривіальною задачею, яка потребує окремих зусиль.

Чисельно-експериментальним методом Монте-Карло встановлено вплив різноманітних типів шумів на сигнал вимірювача оптимальної структури з оцінкою його варіацій навколо неспотвореного шумами варіанту. Аналогічні моделювання виконані для порівняння з результатами попередніх досліджень на неоптимізованому варіанті структури ВСП.

Здійснено дисперсійний ANOVA-аналіз, який дозволив встановити ранги впливів контрольованих параметрів на SNR перетворювача. Окрім того, сформулювати вимоги до точності виготовлення його конструкції та підтримання стабільності частотного режиму вимірювальних випробувань. В результаті цього аналізу виявлена статистична незначущість деяких параметрів вимірювальної котушки, а саме висота та ширина перерізу, та довжина збуджувальної котушки. Ранжувальний ряд параметрів має вигляд: частота збудження, міжосьова відстань між котушками, ширина котушки збудження, довжина вимірювальної котушки, висота перерізу котушки збудження, ширина вимірювальної котушки, ширина перерізу котушки збудження.

Список використаної літератури:

1. Almansoori N, Aldulaijan S, Althani S, Hassan N M, Ndiaye M, Awad M. Manual spray painting process optimization using Taguchi robust design. International Journal of Quality & Reliability Management 38(1), 46-67 (2021).
2. Halchenko, V. Y., Trembovetska, R., Tychkov, V., & Kovtun, V. Robust parameter design of eddy current meters for the electrical conductivity of materials and products of considerable thickness. Measurement, 119218. (2025).
3. Halchenko, V., Trembovetska, R., & Tychkov, V. Robust parameter design of surface eddy current probes. The case of measuring geometric anomalies in a stationary test object. Tekhnichna Elektrodynamika (5), 76-88 (2025).
4. Halchenko, V. Y., Trembovetska, R. V., & Tychkov, V. V. Application of Taguchi Method in Design of Surface Eddy Current Probes for Diagnostics of Power Equipment. Problemele energeticii regionale 64(4), 10-20 (2024).
5. Halchenko, V., Trembovetska, R., & Tychkov, V. Computer robust parameter design of surface eddy current probes. Developing software design of numerical experiments creating. In CEUR Workshop Proceedings 3896, 448-461 (2025).

В'яла О. А.

Студентка гр. ММ-61-24, ХНАДУ

Коваль А. О.

Доцент кафедри МБЖД, к.т.н., ХНАДУ

АДАПТИВНА ФІЛЬТРАЦІЯ ШУМІВ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ

Інтелектуальні інформаційно-вимірювальні системи (ІВС) є складними комплексами сенсорів, аналогово-цифрових перетворювачів, алгоритмів оцінювання та адаптивних модулів корекції похибок. У процесі

функціонування ПВС зазнають впливу шумів різної природи – термічних, електромагнітних, структурних та параметричних. Їхня статистика часто змінюється в часі, що унеможлиблює застосування фільтрів із фіксованими параметрами. Тому актуальним є використання адаптивних фільтрів, здатних самостійно налаштовувати свої параметри під поточні характеристики шуму [1].

Метою роботи є аналіз і розроблення методів адаптивної фільтрації шумів у ПВС, що забезпечують мінімізацію похибок вимірювань у реальному часі при змінних статистичних властивостях сигналу та завад.

У класичних системах фільтрації (наприклад, при використанні фільтрів Калмана) передбачається, що коваріаційні матриці шумів процесу Q і вимірювань R відомі та залишаються сталими. Проте в умовах нестационарних шумів це припущення порушується, що призводить до деградації оцінок. Для усунення цього недоліку розроблені методи адаптивного налаштування Q та R за критеріями інновацій фільтра Калмана [2].

Одним із найпростіших алгоритмів є LMS (Least Mean Squares), який мінімізує середньоквадратичну помилку між вихідним сигналом і оцінкою. Алгоритм оновлює коефіцієнти за формулою:

$$w(k+1) = w(k) + \mu \cdot x(k) \cdot e(k), \quad (1)$$

де $w(k)$ – вектор вагових коефіцієнтів,

$x(k)$ – вектор вхідних даних,

$e(k)$ – похибка,

μ – коефіцієнт навчання.

Модифікації NLMS і RLS дозволяють підвищити швидкість збіжності та робастність при змінних умовах [3].

У сучасних ПВС з багатоканальними сенсорними системами ефективними є гібридні підходи, що поєднують адаптивний Калманівський фільтр (AKF) і методи глибинного навчання. Наприклад, у роботі [4] описано структуру KalmanFormer, де трансформер моделює коефіцієнт підсилення Калмана (Kalman Gain), що дозволяє забезпечити оптимальне оновлення стану при нелінійних спостереженнях.

Крім того, для підвищення співвідношення сигнал/шум (SNR) доцільно застосовувати попередній денойзинг. Метод повного емпіричного розкладання ансамблю з адаптивним шумом у поєднанні з вейвлет-фільтрацією дозволяє адаптивно виділяти інформативні моди сигналу та усувати випадкові завади [5].

У дослідженнях [6] продемонстровано можливість компенсації зовнішніх впливів, таких як температура або вологість, за допомогою адаптивного фільтра Калмана із змінними коефіцієнтами. Це особливо актуально для спектроскопічних вимірювань, де коливання зовнішніх параметрів суттєво впливають на точність сигналу.

Результати моделювання показують, що застосування адаптивних методів дозволяє зменшити середньоквадратичну помилку вимірювання від 20 % до 35 % порівняно з традиційними фільтрами із фіксованими параметрами. Фільтр RLS демонструє найкращу збіжність при низькому рівні шуму, тоді як LMS є ефективним для високочастотних завад. Адаптивний Калман забезпечує найкращий компроміс між швидкістю та точністю в нестационарних середовищах.

На рис. 1 показано зниження шуму після адаптивної фільтрації (RLS), а на рис. 2 – порівняння продуктивності фільтрів. Графіки показують суттєве підвищення сигнал/шум та стабільність оцінок.

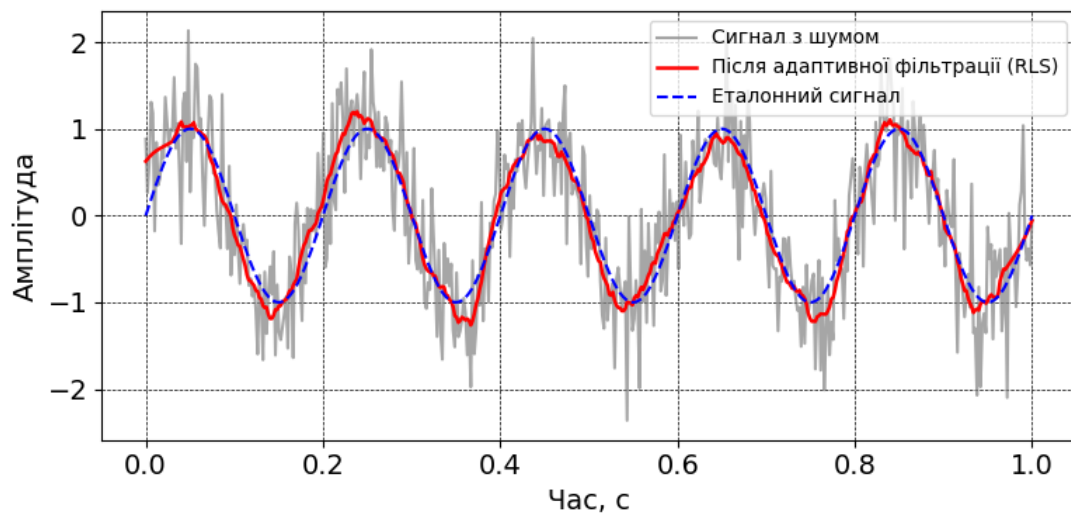


Рисунок 1 – Зниження шуму після адаптивної фільтрації (RLS)

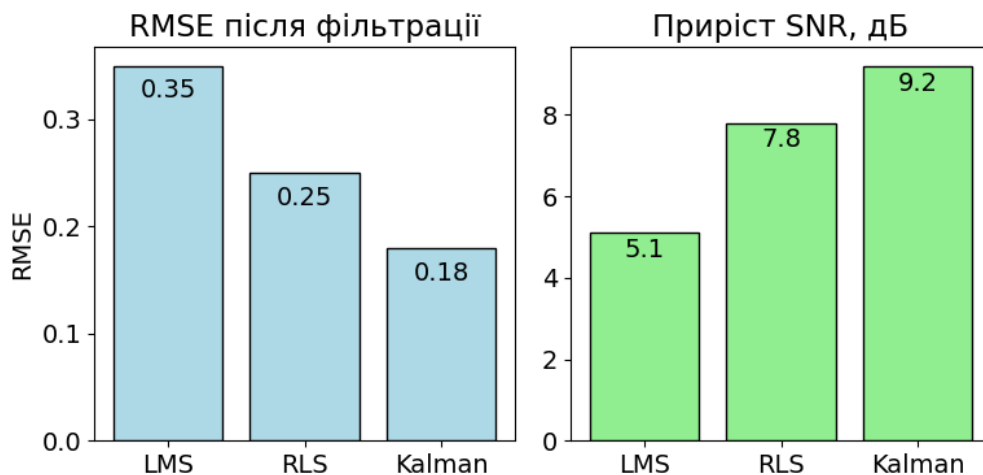


Рисунок 2 – Порівняння продуктивності фільтрів

Як свідчать результати досліджень адаптивна фільтрація є ефективним засобом стабілізації метрологічних характеристик ПВС при змінних умовах експлуатації. Алгоритми LMS/NLMS забезпечують просту реалізацію та добру роботу при незначних змінах статистики шуму. Алгоритми RLS і адаптивні варіанти фільтра Калмана дозволяють досягти високої точності оцінювання навіть за наявності сильних корельованих завад. Поєднання адаптивної фільтрації з глибокими моделями (Transformer, KalmanFormer) відкриває перспективи для створення самонавчальних вимірювальних систем нового покоління.

Перелік використаних джерел:

1. Naya M. Á., Sanjurjo E., Rodríguez A. J., Cuadrado J. Kalman filters based on multibody models: linking simulation and real world. *Multibody System Dynamics*. 2023. T. 58. C. 479–521. DOI: 10.1007/s11044-023-09893-w.
2. Ahmad R., Alotaibi S., Alotaibi M., et al. Online Adaptive Kalman Filtering for Real-Time Anomaly Detection in Wireless Sensor Networks. *Sensors*. 2024. T. 24, № 15. Ст. 5046. DOI: 10.3390/s24155046.
3. Shen S., Chen J., Yu G., Zhai Z., Han P. KalmanFormer: using transformer to model the Kalman Gain in Kalman Filters. *Frontiers in Neurorobotics*. 2024. Article 1460255. DOI: 10.3389/fnbot.2024.1460255.
4. Liu Y., Zuo H., Liu Z., Fu Y., Jia J. J., Dhupia J. S. Electrostatic Signal Self-Adaptive Denoising Method Combined with CEEMDAN and Wavelet Threshold. *Aerospace*. 2024. T. 11, № 6. Ст. 491. DOI: 10.3390/aerospace11060491.
5. Rodríguez A. J., Sanjurjo E., Naya M. Á. An Enhanced Adaptive Kalman Filter for Multibody Model Observation. *Sensors*. 2025. T. 25, № 7. Ст. 2218. DOI: 10.3390/s25072218.
6. Sbarbaro D., Johansen T. A., Yañez J. Adaptive Kalman Filtering for Compensating External Effects in On-Line Spectroscopic Measurements. *Sensors*. 2025. T. 25, № 8. Ст. 2513. DOI: 10.3390/s25082513.

Коришун Є. А., аспірант
Тичков В. В., к.т.н., доцент
Гальченко В. Я., д.т.н., професор
Трембовецька Р. В., д.т.н., професор
кафедра приладобудування, мехатроніки
та комп'ютеризованих технологій,
Черкаський державний технологічний університет

ПРОЕКТУВАННЯ КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ КОНТРОЛЮ ВОДНИХ РЕСУРСІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ІОНСЕЛЕКТИВНИХ СЕНСОРІВ

Проектування комп'ютерно-інтегрованих технологій контролю водних ресурсів за допомогою іонселективних сенсорів полягає у розробці проточно-інжекційних систем, що поєднують автоматизований збір даних з плоских проточних твердотільних іонселективних електродів другого роду, обробку цих даних комп'ютерними методами та їх використання для моніторингу якості води в реальному часі.

Основні аспекти дослідження:

- Розробка сенсорної частини з плоскими твердотільними іонселективними електродами для визначення концентрації іонів і забруднюючих речовин у воді.

- Створення програмного забезпечення для збору, фільтрації та аналізу сигналів сенсорів.

- Впровадження комп'ютерно-інтегрованих технологій для дистанційного моніторингу з віддаленим доступом до результатів.

- Автоматизація процесів контролю з можливістю оперативного реагування на зміни параметрів води.