

## СЕКЦІЯ 11

### МЕТРОЛОГІЯ ТА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 656.01

#### МЕТРОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПАЛИВOROЗДАВАЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ НА ОБ'ЄКТАХ АВТОЗАПРАВНИХ СТАНЦІЙ

Коломієць Л. В., Грабовський О. В., Кузнєцов В. Ф., Кузнєцова Л. В.  
Державний університет інтелектуальних технологій і зв'язку, Одеса, Україна  
E-mail: [leonkolom61@gmail.com](mailto:leonkolom61@gmail.com), [gelond737@gmail.com](mailto:gelond737@gmail.com), [kzvik@gmail.com](mailto:kzvik@gmail.com),  
[kznc0758@gmail.com](mailto:kznc0758@gmail.com).

Метрологічне забезпечення автозаправних станцій (АЗС) – це комплекс робіт, який складається з організаційно-технічних заходів, технічних засобів, правил і норм, які забезпечують єдність і необхідну точність вимірювань під час експлуатації устаткування АЗС, кількісного обліку нафтопродуктів під час приймання, зберігання, відпуску, а також під час визначення показників якості.

Якісне виконання цього комплексу робіт забезпечується з дотриманням вимог стандартів, нормативних документів з урахуванням критеріїв якості та встановлених метрологічних норм точності [1 - 4].

Усі роботи з метрологічного забезпечення на АЗС повинні відповідати:

- створенню необхідних умов для отримання достовірної вимірювальної інформації при визначенні кількості та показників якості нафтопродуктів;
- організації та забезпеченню метрологічного обслуговування засобів вимірювань: обліку, зберігання, калібрування, налагодження, ремонту тощо;
- аналізу стану вимірювань;
- вимогам до проведення повірки та калібрування засобів вимірювань;
- вимогам методики виконання вимірювань для забезпечення точності вимірювань, що виконуються;
- проведенню метрологічної експертизи конструкторської і технологічної документації;
- здійсненню нагляду за контрольним, вимірювальним і випробувальним обладнанням у реальних умовах експлуатації, з дотриманням установлених метрологічних правил і норм;
- забезпеченню достовірного обліку витрат матеріальних, сировинних та паливно-енергетичних ресурсів;
- розробленню та впровадженню сучасних методів і засобів вимірювань, автоматизації контрольної-вимірювального обладнання, вимірювальних систем;
- оцінюванню технічних та економічних наслідків результатів неточних вимірювань;
- організації проведення підвищення кваліфікації персоналу.

Головним елементом автозаправної станції є паливороздавальна колонка (ПРК). Від якості її роботи залежить вся діяльність АЗС, а питання вибору ПРК

при будівництві, реконструкції або заміні старого обладнання, як показує практика, є одним із першочергових.

ПРК – це одиниця обладнання АЗС, призначена для відпуску одного або декількох видів рідкого палива і його відпуску в паливні баки транспортних засобів, або в тару споживача.

ПРК може бути оснащена 10 роздавальними пістолетами та до 5 видів пального. Паливо, яке відпускається, вимірюється мірними ємностями або об'ємними лічильниками і реєструється контрольним пристроєм.

Найбільш поширеними в експлуатації на вітчизняному ринку є ПРК продуктивністю 5-40 л/хв з мінімальною дозою відпуску палива 2 л. Сучасні ПРК оснащені електронною системою управління. Це дає змогу не тільки активувати подачу палива дистанційно, з робочого місця оператора, а й відстежувати процес заправлення на комп'ютері та дисплеї самого паливороздавального агрегату. Механічні пристрої практично не застосовуються.

Протягом року були проведені дослідження і отримані експериментальні дані, які ґрунтуються на роботі ПРК залежно від кліматичних умов. В рамках дослідження були застосовані ПРК серії Tokheim Quantum 510, і Dresser Wayne Hellix 6000 виробництва США, на АЗС південного регіону України.

Щомісяця персонал АЗС проводив пролив ПРК з використанням мірника при різному температурному режимі, а дані, отримані в результаті проливу, записували до Актів проливу ПРК в електронному вигляді відповідно до [5]. Для експерименту використовували ПРК з терміном служби не більше 5 років і однаковим напруцюванням палива А-95 в літрах.

### **Висновки**

Аналіз отриманих даних виявив, що ПРК Dresser Wayne має виражені переваги за показниками «Ремонтопридатність» і «Простота експлуатації», водночас ПРК Tokheim незначно виграє за ціновою політикою.

На підставі цього можна зробити висновок, що вага критерію в частині «Простота експлуатації» і «Ремонтопридатність» є більш значущою за відношенням до ціни. Тому ПРК Dresser, на наш погляд, є оптимальним обладнанням для використання на АЗС південного регіону України.

*Ключові слова:* метрологічне забезпечення, нафтопродукти, автозаправна станція, паливороздавальна колонка, методи вимірювань, якість.

### **Література**

- [1] ДСТУ - Н РМГ 51:2006 Метрологія. Документи до методик повірки засобів вимірювання. Основні положення (РМГ 51-2002, IDT).
- [2] ДСТУ OIML D 8:2008 Метрологія. Еталони. Вибір, визнання, застосування, зберігання та документація.
- [3] ДСТУ OIML D 23:2008 Метрологія. Принципи метрологічного контролю обладнання для повірки.
- [4] ДСТУ OIML R 117-1:2022 Динамічні вимірювальні системи для рідин, інших, ніж вода. Частина 1. Метрологічні та технічні вимоги (OIML R 117-1:2019, IDT).
- [5] ДСТУ 8912:2019 Метрологія. Колонки паливороздавальні для рідкого палива. Методика повірки.

УДК 681.518.22

## РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВЕРШКОВОГО МАСЛА

Григоренко І. В., Чуніхіна Т. В., Григоренко С. М., Шибанов А. А.  
Національний Технічний Університет «Харківський Політехнічний Інститут»  
Харків, Україна

E-mail: [grigmaestro@gmail.com](mailto:grigmaestro@gmail.com), [tetiana.chunikhina@khpi.edu.ua](mailto:tetiana.chunikhina@khpi.edu.ua),  
[svitlana.hryhorenko@khpi.edu.ua](mailto:svitlana.hryhorenko@khpi.edu.ua), [artur.shibanov@infiz.khpi.edu.ua](mailto:artur.shibanov@infiz.khpi.edu.ua).

Виробництво вершкового масла не є повністю автоматизованим, тому стає задачею розробки інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) для впровадження автоматизованого контролю технічних режимів на основних етапах виробництва. Саме це дозволить не тільки дотримуватися встановлених умов виробництва для отримання якісної продукції, а також надасть змогу уникати аварійних ситуацій на виробництві шляхом своєчасного впливу на технологічний процес завдяки виконавчим пристроям.

Проблеми забезпечення високої якості виробництва вершкового масла цікавлять закордонних вчених, про що свідчать роботи [1, 2]. Не стоять осторонь і вітчизняні вчені, які постійно вивчають проблематику та проводять удосконалення існуючого технологічного обладнання молочних виробництв [3-4]. Для вирішення задач контролю технологічного процесу виробництва вершкового масла запропонована ІВС, яка охоплює шість основних ділянок технологічного процесу, а саме: перевірка якості молока, охолодження молока, сепарування молока, пастеризація вершків, охолодження до температури фізичного дозрівання, збивання вершків. Структура ІВС містить шість каналів вимірювання температури на кожному з етапів технологічного процесу. Температура визначається за допомогою первинних вимірювальних перетворювачів ПВП 1, ПВП 3, ПВП 4, ПВП 7, ПВП 8; ПВП 9, у якості яких використовуються термоелектричні перетворювачі з термопарою ТХА. Для компенсації нестабільності температури холодного спаю термопар використано мікросхеми температурної компенсації (MAX31855) ВВП 1 – ВВП 6. Тиск контролюється за допомогою ПВП 5 (APZ 3420s). Рівень рН контролюється за допомогою ПВП 2, ПВП 6, у якості яких використано (Ceragel CPS71). Швидкість обертів мішалки при збиванні вершків контролюється сенсором ПВП 10 (сенсор Холла US1881).

Інформація по каналам вимірювання надходить до мікроконтролера по шині даних. Мікроконтролер проводить обробку отриманої інформації, керування цією інформацією, забезпечує обмін даними між основними частинами системи та зовнішніми пристроями. Мікроконтролер передає інформацію на цифровий відліковий пристрій (ЦВП) для її відображення оператору та спрямовує її до електронно-обчислювальної машини (ЕОМ) завдяки промислового інтерфейсу.

Структурна схема ІВС контролю виробництва вершкового масла представлена на рис. 1.

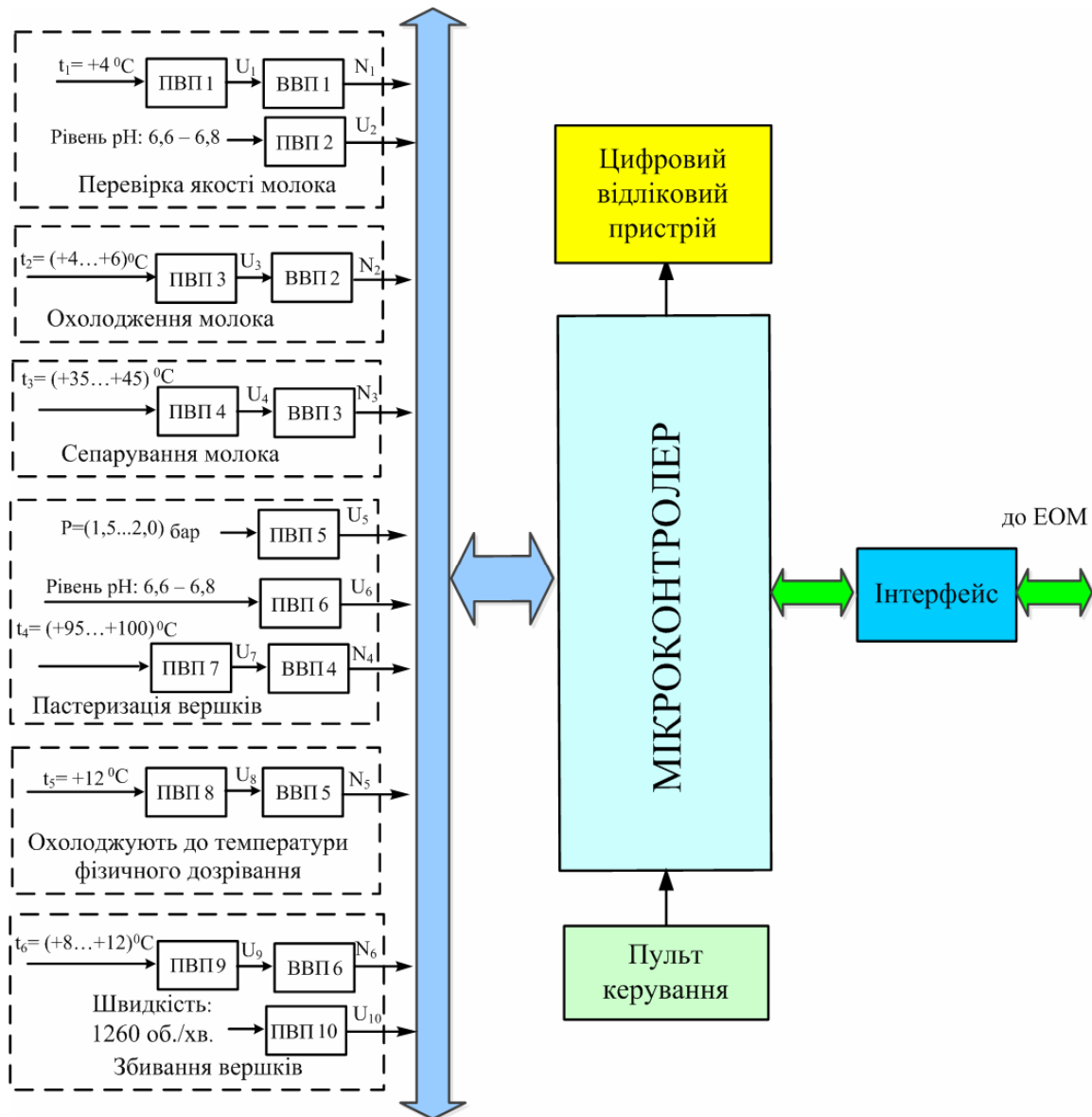


Рисунок 1. Структурна схема ІВС контролю виробництва вершкового масла

Для контролю якості результатів вимірювання параметрів технологічного процесу пропонується підхід, застосований для оцінювання точності результатів вимірювання, отриманих при реалізації технологічного процесу виготовлення вершкового масла на етапі пастеризації вершків на одному із виробничих підприємств України.

Було отримано результати вимірювання температури, виконані в різні два дні контролю технологічного процесу (для вимірювання температури використовувалися термомари градування ТХА). Дані результати вимірювання є результатами вимірювань, представленими декількома серіями вимірювань, а саме, двома серіями вимірювань, у кожній по 35 спостережень. Для оцінювання точності результатів цих вимірювань була застосована відповідна методика обробки результатів вимірювань, представлених декількома серіями [5]. Методика передбачає перевірку результатів вимірювань

на однорідність та рівноточність з попереднім встановленням приналежності результатів вимірювання до нормального розподілу [6].

Враховуючи, що кількість серій вимірювань дорівнювала 2, перевірка на однорідність була виконана із застосуванням критерію Ст'юдента. Перевірка на рівноточність була проведена за критерієм Фішера.

Після підтвердження того, що результати вимірювань є однорідними та рівноточними, подальша їх обробка здійснювалася за методикою обробки результатів прямих багаторазових вимірювань. Розраховане значення незміщеної оцінки середнього квадратичного відхилення результату багаторазових вимірювань температури дозволило розрахувати довірчі границі випадкової похибки результату вимірювання. Сумарна похибка вимірювання температури була розрахована з урахуванням співвідношення границь сумарної невилученої систематичної похибки до середнього квадратичного відхилення [7]. Була врахована невилучена систематична похибка термопари, оскільки саме термоелектричний перетворювач вносить основний внесок в результуючу похибку вимірювання температури вимірювальними каналами.

Співставлення розрахованого значення сумарної похибки вимірювання температури із допустимим значенням абсолютної похибки вимірювання температури технологічного процесу, дозволяє зробити висновок про відповідність метрологічних характеристик інформаційно-вимірювальної системи заданим критеріям точності.

*Ключові слова:* інформаційно-вимірювальна система, первинний вимірювальний перетворювач, вимірювання, похибка.

#### **Література**

- [1] M. E. Aydemir, y S. K. Altun, “Evaluación de mantequilla producida a partir de suero y grasa láctea en términos de algunos criterios de calidad y composición de ácidos grasos”, *Revista Científica de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad del Zulia*, vol. 34, núm. 1, 2024, p. 6. DOI: 10.52973/rcfcv-e34293
- [2] P. B. Zacarchenco, L. M. Spadoti, A. T. Silva e Alves, V. C. Zanetti, S. Verruck, (2023). Probiotic Butter. In: Gomes da Cruz, A., Silva, M.C., Colombo Pimentel, T., Esmerino, E.A., Verruck, S. (eds) Probiotic Foods and Beverages. Methods and Protocols in Food Science. Humana, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3187-4\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-0716-3187-4_4).
- [3] Г. О. Єресько, М. М. Шинкарик, В. Я. Ворошук, *Технологічне обладнання молочних виробництв*. Київ, Україна: ІНКОС, 2007. 344 с.
- [4] М. І. Машкін, Н. М. Париш, *Технологія виробництва молока і молочних продуктів*. Київ, Україна: Вища освіта, 2006.
- [5] В. М. Чинков, *Основи метрології та вимірювальної техніки*: Навч. посібн. - 2-ге вид., перероб. і доп. Харків, Україна: НТУ «ХПІ», 2005.
- [6] 2. JCGM 200:2008. International vocabulary of metrology-Basic and general concepts and associated terms (VIM).
- [7] O. Piven, T. Chunikhina, “Measurements Accuracy in the Research of Food Emulsion Stability Based on the Regression Analysis. Metrology and Metrology Assurance (MMA-2022)”, in *Proc. of 2022 XXXII International Scientific Symposium*, Sozopol, Bulgaria, 07-11 September 2022, pp. 1-4, DOI: 10.1109/MMA55579.2022.9992418.

УДК 681.518.3

## ОЦІНКА МЕТРОЛОГІЧНОЇ НАДІЙНОСТІ АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО БЛОКУ ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ НА ЕТАПІ ЙОГО ПРОЄКТУВАННЯ

*Денисюк В. Ю.*

*Луцький національний технічний університет, Луцьк, Україна*

*E-mail: [v.denysiuk@lntu.edu.ua](mailto:v.denysiuk@lntu.edu.ua)*

Перспективним напрямом для дослідження метрологічних властивостей блоку аналого-цифрового перетворення на етапі його проєктування є використання формалізованого опису вимірювальних процедур, що реалізуються в даному блоці. При цьому використання метрологічного аналізу, що застосовується на базі апріорної інформації (базис знань), представлені у вигляді рівнянь вимірювань і математичних моделей об'єктів, умов і вимірювальних засобів, дозволяє отримати значення характеристик похибки, можливий діапазон її зміни для блоку АЦП, що розглядається, і використовувати отримані при цьому значення для розрахунку аналізованого показника метрологічної надійності – метрологічного ресурсу [1, 2].

Розробка алгоритмів метрологічного аналізу та оцінки метрологічної надійності АЦП є завданням, вирішення якого дозволяє споживачеві точніше визначити метрологічну надійність на будь-який момент часу їх експлуатації в реальних умовах, правильно вибрати терміни перевірок та профілактичних робіт та збільшити час метрологічної справності АЦП у структурі інформаційно-вимірювальних систем (ІВС) [3, 4].

Оцінка метрологічної надійності аналого-цифрового перетворювача на етапі його проєктування являє собою вирішення завдання прогнозування метрологічної надійності. Тому, прогнозування метрологічної надійності проєктованого блоку в структурі ІВС можна розглядати як завдання прогнозування стану його метрологічних характеристик. Вирішення такої проблеми має кінцеву мету – визначити метрологічну надійність аналогово-цифрового перетворювача, насамперед метрологічного ресурсу, а також підвищити якість роботи проєктованого блоку, покращивши його метрологічні властивості. Прогнозованим є процес зміни в часі досліджуваної метрологічної характеристики аналого-цифрового перетворювача, що оцінюється зміною в часі математичного очікування і середньоквадратичного відхилення досліджуваної метрологічної характеристики. Метрологічною характеристикою у дослідженні є похибка аналогово-цифрового перетворювача.

Ефективним апаратом для вирішення завдання оцінки метрологічної надійності аналого-цифрового перетворювача є методологія аналітико-ймовірнісного прогнозування, яка заснована на математичному моделюванні нестационарного випадкового процесу зміни в часі похибки АЦП і включає наступні етапи.

1. Побудова математичної моделі функціонування аналого-цифрового перетворювача, що визначає аналітичний вираз вихідного сигналу АЦП.
2. Складання математичної моделі досліджуваної метрологічної характеристики з урахуванням отриманої раніше математичної моделі функціонування аналого-цифрового перетворювача.
3. Статистичне моделювання досліджуваної метрологічної характеристики з використанням необхідної бази апріорних знань, що дозволяє отримати значення аналізованої метрологічної характеристики в різні моменти часу.
4. Побудова математичних моделей процесу зміни у часі метрологічної характеристики АЦП у вигляді сукупності аналітичних залежностей, отриманих для функцій зміни у часі її математичного очікування та функцій, що характеризують зміну в часі меж відхилення можливих значень метрологічної характеристики від її математичного очікування.
5. Визначення необхідного показника метрологічної надійності, у якості якого розглядається величина метрологічного ресурсу.

Оцінка метрологічної надійності аналого-цифрового перетворювача з використанням аналітико-ймовірнісного прогнозування дає можливість отримати ймовірнісну оцінку обраного показника метрологічної надійності і в подальшому, при необхідності, вжити заходів для збільшення цього показника на етапі проектування блоку.

Вирішення завдання визначення метрологічної надійності аналого-цифрового перетворювача проводиться на основі функціональної схеми аналого-цифрового перетворювача (рис. 1). Як правило, до складу вимірювального каналу аналого-цифрового перетворювача входять наступні модулі: ланцюг диференціального навантаження та узгодження, нормалізуючий підсилювач, пристрій формування частоти.



Рис. 1. Функціональна схема блоку АЦП

Можливі два підходи до визначення основного показника метрологічної надійності – метрологічного ресурсу проєктованого блоку аналого-цифрового перетворювача. Вибір одного з них визначається конкретною постановкою завдання, вимогами до точності прогнозування та оперативності прийняття рішення про метрологічну надійність блоку.

Перший підхід дозволяє визначити метрологічний ресурс з урахуванням домінуючого впливу основного модуля в структурі аналого-цифрового перетворювача. З використанням аналітико-ймовірнісного прогнозування проводиться розрахунок значення метрологічного ресурсу для виділеного домінуючого модуля. Результат оцінки метрологічної надійності аналого-цифрового перетворювача у цьому випадку можна визначити за

співвідношенням:

$$t_p^{АЦП} = t_p^{ДМ}, \quad (1)$$

де  $t_p^{АЦП}$  – метрологічний ресурс всього блоку аналого-цифрового перетворювача;

$t_p^{ДМ}$  – метрологічний ресурс домінуючого модуля блоку АЦП.

Другий підхід до оцінки метрологічного ресурсу на етапі проектування аналого-цифрового перетворювача дозволяє врахувати при визначенні метрологічного ресурсу аналого-цифрового перетворювача метрологічні властивості всіх складових блоків модулів. У цьому випадку з використанням заданого значення довірчої ймовірності розраховується величина метрологічного ресурсу для кожного з модулів, що входять в аналого-цифровий перетворювач. Результат оцінки метрологічного ресурсу АЦП визначається відповідно до виразу:

$$t_p^{АЦП} = \min\{t_p^{ДН}, t_p^{НП}, t_p^{ПФЧ}\}, \quad (2)$$

де  $t_p^{АЦП}$  – метрологічний ресурс блоку аналого-цифрового перетворювача;

$t_p^{ДН}, t_p^{НП}, t_p^{ПФЧ}$  – метрологічний ресурс модуля ланцюга диференціального навантаження та узгодження, нормалізуючого підсилювача, пристрою формування частоти відповідно.

Цей підхід відрізняється більшою точністю і може бути застосований при формуванні остаточного рішення щодо метрологічної надійності всього блоку після детального опрацювання окремих модулів. Отримані математичні моделі зміни у часі метрологічної характеристики блоку дають змогу провести визначення величини міжповірочного інтервалу та дати при необхідності рекомендації щодо метрологічного обслуговування досліджуваного блоку на етапі експлуатації. Цей підхід реалізує методологію аналітико-ймовірнісного прогнозування, тому доцільно розглянути детально виділені етапи аналітико-ймовірнісного прогнозування, визначаючи особливості їх використання в кожному із двох названих підходів до оцінки метрологічної надійності.

**Ключові слова:** метрологічна надійність, метрологічний ресурс, точність, проектування, математична модель, блок АЦП.

#### **Література**

- [1] Н. М. Защепкіна, О. В. Шульга, О. А. Наконечний, *Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем: навч. посіб.* Київ, Україна: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021.
- [2] В. Ю. Денисюк, «Проблеми забезпечення точності та метрологічної надійності інформаційно-вимірювальних систем», на *XXIII Міжнар. наук.-техн. конф. Приладобудування: стан і перспективи*, Київ, 2024, с. 345-348.
- [3] В. О. Яцук, Т. З. Бубела, М. М. Микийчук, Є. В. Походило, «Забезпечення метрологічної надійності в розпорошених вимірювальних системах», *Вимірювальна техніка та метрологія*, Т. 79, Вип. 3, с. 71-82, 2018.
- [4] В. Ю. Денисюк, В. П. Симонюк, Ю. С. Лапченко, Б. І. Новосад, «Метрологічне забезпечення точності приладів активного контролю в процесі обробки», *Перспективні технології та прилади: зб. статей*, Вип. 16, с. 38-47, 2020.

УДК 621.891.539.375.6

## ВИКОРИСТАННЯ ІНТЕРНЕТ-РЕСУРСІВ ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ МЕТАЛЕВИХ ПОКРИТТІВ

*Красота А. М., Шепеленко І. В., Красота М. В.*

*Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна*

*E-mail: [kntucpfzk@gmail.com](mailto:kntucpfzk@gmail.com)*

В сучасних умовах значного зростання вартості сировини та енергії вкрай важливим видається необхідність використовувати у машинобудуванні властивості металів, застосовуючи захисні покриття [1]. Можливість отримання робочої поверхні деталі з поєднанням властивостей основного матеріалу і покриття дає змогу значно поліпшити експлуатаційні властивості виробу.

Одним із перспективних методів нанесення покриттів є фінішна антифрикційна безабразивна обробка (ФАБО), яка полягає у нанесенні тонкого (до 5 мкм) шару твердозмашувального матеріалу шляхом використання явища перенесення металу при терті [2].

Для оцінки якості покриттів, отриманих ФАБО, використовують ряд вимог, серед яких варто виокремити щільність і суцільність покриття [3].

Традиційні методи визначення суцільності покриття, такі як металографічний аналіз, потребують спеціального обладнання та підготовлених досліджуваних зразків. Тому, виникає потреба у використанні сучасних цифрових методів досліджень, що дозволяють швидко і об'єктивно визначати якість нанесення металевих покриттів.

Суцільність покриття може бути оцінена шляхом цифрової обробки результатів металографічного аналізу поверхні [4].

Для оцінки якості ФАБО зразків із сірого чавуну СЧ20 в даній роботі запропоновано до розгляду методи цифрової обробки зображень із застосуванням інтернет-ресурсів: ImageJ, GIMP із плагіном G'MIC та модель штучного інтелекту ChatGPT.

ImageJ – програма для аналізу зображень, яка розроблена для наукових досліджень та проведення кількісного аналізу поверхонь. Програма дозволяє визначати площу покриття та можливі дефектів. Дані, отримані за допомогою ImageJ, дозволили визначити суцільність покриття досліджуваного зразка на рівні 68,62 %.

Аналіз якості покриття виконувався також з використанням сервісу GIMP. GIMP – це редактор зображень, а G'MIC – плагін, який розширює його функціонал для аналізу текстур і поверхонь. GIMP із G'MIC може бути використано для візуалізації дефектів покриття шляхом виділення границь між шаром покриття і основою. Задля розділення антифрикційного покриття і матеріалу основи досліджуваного зразка застосовано функція розділення за кольором. Використання GIMP із G'MIC дозволило визначити суцільність, значення якого склало 58,03 %.

Модель штучного інтелекту ChatGPT, який розроблений OpenAI, також може бути застосований для якісного вивчення зображень. ChatGPT аналізує текстуру поверхні, ідентифікуючи контрастні області, які можуть вказувати на можливі дефекти покриття, такі як пори і тріщини, але на відміну від ImageJ і GIMP, не надає кількісних даних, хоча і забезпечує швидку попередню оцінку суцільності покриття. За даними, отриманими за допомогою ChatGPT, суцільність антифрикційного покриття складає 45,7 %.

Результатами проведених досліджень є наступні:

1. Запропоновано підхід до використання інтернет-ресурсів (ImageJ, GIMP із G'MIC та ChatGPT) для швидкого та ефективного графічного аналізу зображення деталі з метою оцінки якості нанесення антифрикційних покриттів. При цьому ImageJ забезпечив кількісну оцінку контрастних одиниць, GIMP із G'MIC дозволив візуалізувати границі антифрикційного покриття, а ChatGPT – провести швидку попередню оцінку суцільності покриття з найменшими витратами часу.

2. Встановлено, що ImageJ є достатньо ефективним інструментом для оцінки однорідності покриття, але потребує попередньої підготовки зображення для коректного виділення границь покриття. GIMP із плагіном G'MIC також вимагає налаштування ряду параметрів обробки інформації, забезпечуючи при цьому наочне представлення якості поверхні покриття. ChatGPT може бути використано для швидкого отримання первинного аналізу та не потребує додаткових налаштувань.

**Ключові слова:** захисні покриття, фінішна антифрикційна безабразивна обробка, суцільність покриття, інтернет-ресурси.

#### **Література**

- [1] Є. К. Солових, *Тенденції розвитку технологій поверхневого зміцнення у машинобудуванні*, Монографія, Кіровоград, Україна: КОД, 2012.
- [2] I. Shepelenko et al., "Power Parameters of Micro-cutting During Finishing Anti-friction Non-abrasive Treatment", *New Technologies, Development and Application III. NT 2020. Lecture Notes in Networks and Systems*, Springer, Cham, pp. 194–201, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-46817-0\_22.
- [3] I.V. Shepelenko, "Technological factors influence on the antifriction coatings quality", *Problems of Tribology*, vol. 26, no. 2/100, pp. 50–57, 2021. DOI: 10.31891/2079-1372-2021-100-2-50-57.
- [4] I. В. Шепеленко, О. М. Дреєв, Р. Ф. Будар Мохамед, "Визначення якості металевих покриттів", на *Між нар. наук.-практ. конф. Молодь і технічний прогрес в АПК. Інноваційні розробки в аграрній сфері*, Харків, с. 298–299, 2020.

УДК 004.93

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ РОЗМІРІВ КРАПЛІ РІДИНИ З ДОПОМОГОЮ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

*Біліщук В. Б.*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,*

*Івано-Франківськ, Україна*

*E-mail: [viktor.bilishchuk@nung.edu.ua](mailto:viktor.bilishchuk@nung.edu.ua)*

Застосування технологій комп'ютерного зору для таких цілей дозволяє автоматизувати процеси визначення розмірів об'єктів на зображеннях, що автоматизовує і прискорює процеси проведення вимірювань [1]. Питанням ідентифікації і визначення розмірів об'єктів на цифрових зображеннях присвячена велика кількість робіт. Відомі роботи [2], [3], в яких програмне забезпечення розроблялось без використання спеціалізованих бібліотек, тому процес розроблення програмного забезпечення був досить трудомістким. Використання спеціалізованих програмних бібліотек дозволяє спростити процес розробки програмного забезпечення. Однією із таких бібліотек є OpenCV (Open Source Computer Vision Library), яка дозволяє виконувати завдання з обробки зображень та комп'ютерного зору, включаючи: виявлення, розпізнавання і визначення розмірів об'єктів.

При використанні алгоритмів розпізнавання об'єктів на зображеннях виділяють типові послідовності дій: згладжування, фільтрація перешкод, підвищення контрасту; бінаризацію зображення і виділення контурів об'єктів; фільтрацію контурів по розмірах, площі, формі; пошук контуру, максимально схожого на шаблон.

Робота присвячена розробленню методики визначення розмірів краплі рідини на цифровому зображенні з використанням технологій комп'ютерного зору, що може бути використано для дослідження змочування рідинами твердих тіл. Зокрема, в методі [4] розміщують краплю із заданим об'ємом на поверхні твердого тіла. Якщо крапля змочує поверхню твердого тіла, то вимірюють радіус основи краплі. Якщо крапля не змочує поверхню твердого тіла, то вимірюють радіус меридіану. Крайовий кут змочування розраховують на основі вимірюного радіуса і заданого об'єму краплі. Вимірювати радіус краплі рідини можна шляхом отримання цифрового зображення краплі і з подальшою обробкою відповідним програмним забезпеченням.

Обробка зображення передбачає виконання ряду операцій. Спочатку цифрове зображення перетворюють на сіре. Інтенсивність кожного пікселя на сірому зображенні – це зважене середнє кольорових каналів оригінального пікселя. Перетворення зображення з кольорового в градації сірого здійснюють функцією `cvtColor`.

Далі виконують розмиття зображення для зменшення впливу шуму, що спрощує процес виявлення країв та контурів. Розмиття зображення виконують

згорткою гаусовим ядром. В бібліотеці OpenCV для розмиття використовують функцію `cv2.GaussianBlur`. Ступінь розмиття задають розміром ядра згортки.

Наступним етапом є виділення контурів об'єктів на зображенні. Для знаходження контурів об'єктів на зображенні, використовують функцію `findContours`. Функція `findContours` для виявлення країв об'єктів на зображенні використовує алгоритм Кенні. Він вважається одним з найефективніших алгоритмів виявлення країв і часто використовується в комп'ютерному зорі. В цьому алгоритмі обчислюється градієнт зображення для визначення напрямку та інтенсивності зміни яскравості. Обчислення градієнтів здійснюється обчисленням згортки за допомогою оператора Собеля.

Немаксимальне придушення застосовується для “проріджування” країв. Для кожного пікселя перевіряється, чи є він максимумом у напрямку градієнта. Якщо ні, піксель придушується – його значення встановлюється в нуль. Таке перетворення створює краї границь об'єктів як тонкі лінії. В підпрограмі `findContours` використовують два порогові значення  $\sigma_l$  і  $\sigma_h$  для визначення справжніх країв. Сильні краї з значенням градієнта, який вищий за високий поріг  $\sigma_h$  визнаються як справжні краї. Краї з значенням градієнта нижче низького порогу  $\sigma_l$  відкидаються. Інші краї з значенням градієнта, що знаходяться між двома порогамі, позначаються як слабкі краї. Такі області потребують додаткової перевірки. Нижній поріг для процесу гістерезису  $\sigma_l$  – це мінімальна інтенсивність, яка вважається досить сильною, щоб бути визначеною як край. Верхній поріг для процесу гістерезису  $\sigma_h$  визначає мінімальну інтенсивність для пікселів, які можуть бути визнані як край, якщо вони з'єднуються з сильними краями. Правильний вибір цих порогів визначає ефективність алгоритму детектування країв.

Інші параметри функції `findContours mode` і `method` визначають алгоритм сканування зображення і збереження контурів. Наприклад, виклик функції `findContours` з параметром `mode` рівним `cv2.RETR_EXTERNAL` вказує функції `findContours` знаходити тільки зовнішні контури, тобто ті, які не містяться всередині інших контурів. В процесі сканування зображення згідно алгоритм визначається, чи слід з'єднувати знайдені слабкі краї з сильними. Якщо слабкий край з'єднаний з сильним краєм, він вважається справжнім краєм, інакше він відкидається. А застосування параметру `method` із значенням `cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE` вказує, що контури буде апроксимовано лініями між сусідніми точками.

Функція `findContours` повертає кортеж: послідовність контурів  $S$  та ієрархію  $H$ . Кожен контур  $S$  визначений як послідовність точок. Ієрархія  $H$  може представлятись у вигляді матриці або деревовидної структури, що описує взаємозв'язки між контурами. Ієрархія визначає, як контури пов'язані між собою: які з них є дитячими, батьківськими, а також наступними та попередніми на даному рівні ієрархії  $H$ . Інформація про ієрархію може використовуватись для аналізу структури об'єктів на зображенні, визначення та інтерпретації взаємозв'язків між контурами.

Якщо фотографія краплі якісно зроблена, то на зображенні має бути один контур круглої форми, який відповідає розмірам основи або меридіану краплі рідини. Тому наступною задачею є знаходження розмірів, а точніше радіусу контуру у формі кола на зображенні. Для визначення розмірів контуру об'єкту у вигляді еліпса або кола в бібліотеці OpenCV, використовують функції `minEnclosingCircle` або `cv2.fitEllipse`. Так як контур краплі рідини на зображенні по формі найближчий до кола, то доцільніше використовувати функцію `minEnclosingCircle`. Цю функцію використовують для знаходження найменшого кола, яке може повністю охопити контур, що заданий набором точок. Функція `minEnclosingCircle` визначає радіус кола і координати його центру.

Наступним етапом є визначення реальних розмірів кола на зображенні. Для цього разом із об'єктом невідомих розмірів на зображенні розміщують об'єкт з відомими розмірами. В якості такого об'єкта розміщують тіло простої форми – квадрат, круг, розміри якого також вимірює програма комп'ютерного зору. На основі вимірювань і відомих розмірів розраховують коефіцієнт перетворення цифрового зображення.

В роботі досліджено методику ідентифікації і визначення розмірів краплі рідини на горизонтальній твердій поверхні на цифровому зображенні з використанням технологій комп'ютерного зору. На основі зробленого дослідження запропоновано використання бібліотеки Open CV для розробки програмного забезпечення для визначення крайового кута змочування на основі вимірювання розмірів краплі рідини. Програмне забезпечення із використанням бібліотек Open CV може бути впроваджене на мікрокомп'ютерах, що відкриває широкі можливості для розроблення приладів для дослідження поверхневих властивостей рідин.

*Ключові слова.* Контур, крайовий кут змочування, радіус, зображення, алгоритм,

#### **Література**

- [1] OpenCV. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://uk.wikipedia.org/wiki/OpenCV> (Дата звернення: 12.03.2025 р.).
- [2] В. Б. Біліщук, Б. В. Костів, Р. Т. Боднар, “Методика аналізу цифрових зображень для визначення координат точок контуру фіксованої обертової краплі в міжфазній тензіометрії”, *Методи та прилади контролю якості*, № 2 (33), с. 59-65, 2014.
- [3] В. Б. Біліщук, “Застосування зразкових зображень для аналізу цифрових зображень фіксованих обертових крапель”, *Методи та прилади контролю якості*, № 2 (35), с. 48-53, 2015.
- [4] Р. Т. Боднар, В. Б. Біліщук, “Контроль змочування в промислових умовах оптичним методом”, на 8-ій міжнар наук. техн. конфю Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання, Івано-Франківськ, 2017, с. 111-112.

УДК 532.6.08

## ПРИСТРІЙ ДЛЯ ОПЕРАТИВНОГО КОНТРОЛЮ ЗМОЧУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ

*Боднар Р. Т.*

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,*

*Івано-Франківськ, Україна*

*E-mail: [bodnar.roman2014@gmail.com](mailto:bodnar.roman2014@gmail.com)*

У різних виробничих процесах важливу роль відіграє адгезія, тобто взаємодія між твердими тілами і рідинами, зокрема, в нанесенні різних покриттів на вироби, в капілярному неруйнівному контролі, в нафтовидобутку, поліграфії, медицині, сільському господарстві, та ін. [1]. Результатом такої фізико-хімічної взаємодії є так зване змочування поверхні твердого тіла рідиною, яке визначає силу зчеплення між поверхнею твердого тіла і рідиною.

Якість продукції в таких процесах змочування оцінюються переважно тільки якісно, без кількісної оцінки, наприклад, візуально. В сучасних умовах такий рівень контролю є недостатнім. Для забезпечення оптимальності успішного проведення технологічних процесів із використанням змочування доцільно контролювати процеси змочування з використанням відповідних технічних засобів, які б дозволяли здійснювати процес контролю оперативно і з потрібною точністю. Причому слід враховувати, що вироби, поверхні яких контролюють, бувають масивними, які не можливо встановити на лабораторний прилад, і не завжди є горизонтальними.

Параметром, що визначає змочувальну властивість твердих тіл рідиною, є крайовий кут змочування (ККЗ). [2]. Серійних приладів, які б виготовлялись промисловістю, для контролю к. к. з. немає, тому дослідники використовують в основному підручні засоби, найчастіше застосовують фотографування крапель або проектування їхнього профілю на екран, а на отриманих зображеннях проводять прямі вимірювання ККЗ. Такі методи є досить неоперативними і недостатньо точними. Для підвищення точності та оперативності контролю ККЗ доцільно використати сучасні оптоелектронні засоби, які функціонують сумісно з персональними комп'ютерами (ПК), що дозволяє автоматизувати процес контролю ККЗ і проводити його оперативно.

Зокрема, з цією метою використано портативний цифровий мікроскоп типу "Shinevisiondigitale", з допомогою якого отримується на моніторі ПК зображення профілю краплі досліджуваної рідини на поверхні досліджуваного об'єкта.

З метою проведення досліджень ККЗ в промислових умовах розроблено установку, схему якої показано на рис. 1.

Цифровий мікроскоп 2 встановлюють на спеціальному штативі 7, що дозволяє зафіксувати мікроскоп у потрібному просторовому положенні біля об'єкта контролю 6. На ділянку, де буде проводитись визначення ККЗ, спочатку встановлюється спеціальний еталон довжини 4.

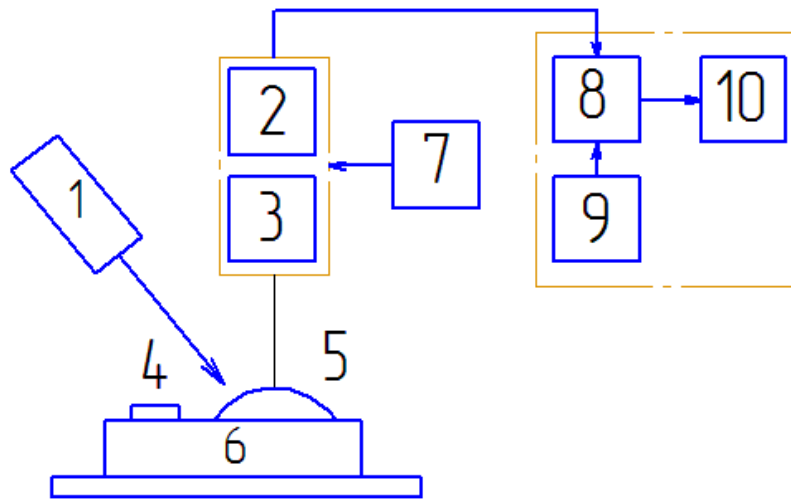


Рис. 1. Схема установки для контролю змочування, де 1 – освітлювач, 2 – цифровий мікроскоп, 3 – об'єктив, 4 – калібр, 5 – крапля, 6 – об'єкт контролю, 7 – штатив, 8 – ПК, 9 – клавіатура, 10 – дисплей

Його зображення, отримане за допомогою мікроскопа, служить для калібрування вимірювань. Далі на цю ділянку об'єкта контролю наносять за допомогою прецизійного мікродозатора краплю 5 досліджуваної рідини. Її зображення заноситься у пам'ять персонального комп'ютера для обробки.

Важливу роль відіграє правильно поставлене освітлення краплі за допомогою такого взаєморозміщення освітлювача 1, краплі 5 та фонового екрану, щоб отримане зображення краплі було контрастним і без бліків, оскільки, це значно покращить комп'ютерну обробку зображення краплі.

Визначення ККЗ базується на зв'язку площі основи краплі, яка розтікається по поверхні контрольованого об'єкта, із величиною змочування. Визначення площі основи краплі на цифровому зображенні здійснюють в декілька етапів.

Спочатку визначають точки межі основи краплі на зображенні з використанням алгоритму відділення об'єкту від фону по яскравості точок зображення. Цей алгоритм не є достатньо точним. Тому, з метою прецизійного визначення точок межі основи краплі на наступному етапі використовують алгоритм Кенні, який працює у вікні  $13 \times 13$  пікселів в околі точки, визначеної на попередньому етапі [3].

Згідно з алгоритмом Кенні здійснюють фільтрування зображення за допомогою оператора Гауса, який є фільтром низьких частот і призначений для зменшення шумів на зображенні; обчислюють модуль градієнта яскравості зображення з допомогою оператора Собела. Шуми, що присутні на зображенні, мають значний вплив на результат визначення градієнта яскравості оператором Собела. Причиною появи шумів є теплові шуми в матриці з зарядовим зв'язком (ПЗЗ) фотокамери. Найпростішим є оператор, в якому яскравість точки у відфільтрованому зображенні рівна середньому арифметичному значенню яскравостей сусідніх точок. Такому операторові властивий недолік –

спотворення контурів об'єктів на зображенні. Цей недолік суттєво зменшений в операторі Гауса.

Гradient яскравості з допомогою оператора Собела розраховують по рядках (горизонтальний gradient) та стовпцях (вертикальний gradient) матриці  $F$ . Результатом розрахунку є матриці  $U$  та  $V$ , значення елементів яких розраховують за виразами:

$$\begin{aligned} U_{zx} &= \sum_{z=1}^{x+1} \sum_{l=y-1}^{y+1} (F_{kl} u_{k-x+l, l-y+1}), \\ V_{xy} &= \sum_{k=x-1}^{x+1} \sum_{l=y-1}^{y+1} (F_{kl} u_{k-x+l, l-y+1}), \end{aligned} \quad (1)$$

де  $U, V$  – матриці операторів Собела [3].

Модуль gradienta  $G_{i,j}$  визначають наступним чином:

$$GG_{zx} = \sqrt{U_{zx}^2 + V_{zx}^2}. \quad (2)$$

Максимальне значення gradienta у вказаному вікні відповідає точці, яка є межею основи краплі. На завершальному етапі відбувається сканування цифрового зображення з метою підрахунку кількості пікселів, які належать основі краплі. На основі цього підрахунку і попередньо здійсненого калібрування приладу розраховують дійсну площу контакту краплі із поверхнею об'єкта і значення ККЗ.

*Ключові слова:* змочування, крайовий кут змочування, цифровий мікроскоп, gradient яскравості, піксель, цифрова обробка зображень.

#### **Література**

- [1] В. Д. Михайлюк та ін., *Використання поверхнево-активних речовин в процесах нафтовидобутку на родовищах ВАТ "Укрнафта"*. Івано-Франківськ, Україна: ПП "Галицька друкарня ПЛЮС", 2009.
- [2] І. С. Кісіль та ін., *Вимірювання поверхневих властивостей на межах розділу фаз*. Монографія в 2-х т. Т. 2. Івано-Франківськ: Україна, ІФНТУНГ, 2018.
- [3] R. Maini, N. Aggarwal, "Stady and Comparison of Various Image Edge Detection Techniques", *International Journal of Image Processing*, vol. 3: Issue (1), 2009. Дата звернення: 20 груд. 2024. [Онлайн]. Доступно: [https://www.researchgate.net/publication/272023819\\_Comparison\\_of\\_Edge\\_Detection\\_Technique\\_in\\_Image\\_Processing\\_Techniques](https://www.researchgate.net/publication/272023819_Comparison_of_Edge_Detection_Technique_in_Image_Processing_Techniques)

UDC 631.52

## INTEGRATING INFORMATION MEASUREMENT TECHNIQUES FOR SUSTAINABLE FARMING

<sup>1)</sup>Klochko N. B., <sup>2)</sup>Dolishniy B. V., <sup>2)</sup>Vyhovanets V. Ya.

<sup>1)</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk, Ukraine,

<sup>2)</sup>Ivano-Frankivsk Professional College of Lviv National University of Environmental Management, Ivano-Frankivsk, Ukraine,

E-mail: [natalia.klochko@nung.edu.ua](mailto:natalia.klochko@nung.edu.ua), [bdolishniy@gmail.com](mailto:bdolishniy@gmail.com), [viktor8468@ukr.net](mailto:viktor8468@ukr.net)

The integration of information measurement techniques into agricultural practices has revolutionized farming operations. As global challenges related to food security, environmental sustainability, and climate change intensify, it becomes imperative for agriculture to adopt innovative approaches that optimize resource use, enhance productivity, and minimize ecological footprints. Precision agriculture, powered by information measurement techniques, emerges as a key solution in addressing these challenges.

This thesis explores how modern tools, such as sensors, remote sensing technologies, Internet of Things (IoT) devices, and advanced data analytics, are transforming agricultural practices by enabling farmers to make more informed and precise decisions [1-2]. These technologies allow for the real-time monitoring and management of variables like soil conditions, crop health, and weather patterns, thereby ensuring the efficient use of water, fertilizers, and pesticides. By employing these advanced techniques, farmers can significantly reduce input waste, increase crop yields, and minimize their environmental impact, thus contributing to the long-term sustainability of agricultural systems. The research highlights several case studies where the implementation of information measurement techniques has resulted in substantial improvements in resource efficiency, cost reduction, and productivity gains. For instance, smart irrigation systems that utilize soil moisture sensors have helped farmers conserve water in drought-prone regions, while drone-based crop health monitoring has enabled timely disease detection and reduced pesticide use.

However, despite their potential, the widespread adoption of these technologies faces barriers such as high initial costs, data overload, and limited technological access in rural areas. This thesis also addresses these challenges, offering recommendations for overcoming these obstacles through collaboration between governments, private sectors, and research institutions to provide the necessary infrastructure, training, and support for farmers.

Looking ahead, the future of sustainable farming will be shaped by continued advancements in artificial intelligence, machine learning, and the rollout of 5G technology, which promises to further enhance the precision, scalability, and accessibility of these innovative tools. The integration of blockchain for transparency in agricultural supply chains and the ongoing development of autonomous farming

systems will further contribute to the sustainability and resilience of the agricultural sector.

In conclusion, integrating information measurement techniques into farming is not merely a technological advancement but a vital step toward creating a sustainable agricultural future. By harnessing these technologies, agriculture can become more efficient, resilient, and environmentally friendly, meeting the demands of a growing global population while safeguarding the planet's resources for future generations.

**Keywords:** sustainable farming, precision agriculture, information measurement techniques, Internet of Things (IoT).

#### References

- [1] J. Smith and A. Brown, "Precision Agriculture: Advancements and Challenges," *Journal of Agricultural Engineering*, vol. 45, no. 2, pp. 123-136, 2022.
- [2] B. Lee, T. H. Nguyen, and K. D. Smith, "The Future of Precision Agriculture: Challenges and Opportunities for Sustainable Development," *Agricultural Systems*, vol. 87, no. 1, pp. 10-25, 2023. DOI: 10.1016/j.agry.2023.01.003.

УДК 628.24

### БАГАТОКАНАЛЬНА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНА СИСТЕМА ДЛЯ БЕЗКОНТАКТНОЇ ДІАГНОСТИКИ ПІДЗЕМНИХ КОМУНІКАЦІЙ

<sup>1)</sup>Ващишак І. Р., <sup>2)</sup>Ващишак С. П., <sup>2)</sup>Доценко Є. Р.

<sup>1)</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Івано-Франківськ, Україна

<sup>2)</sup>ЗВО Університет Короля Данила, Івано-Франківськ, Україна

E-mail: [iryna.vashchyshak@nung.edu.ua](mailto:iryna.vashchyshak@nung.edu.ua), [serhii.vaschyshak@ukd.edu.ua](mailto:serhii.vaschyshak@ukd.edu.ua),  
[yedotsenko@gmail.com](mailto:yedotsenko@gmail.com)

Для пошуку та діагностики підземних комунікацій (металевих трубопроводів та кабелів) використовуються декілька типів металошукачів [1], які можна поділити на дві основні групи - індукційні (вихорострумові) та магніточутливі (МЧМ). Індукційні металошукачі дають змогу знаходити будь-які провідні предмети, розміщені у непровідному, або слабо провідному середовищі. Індукційні металошукачі працюють за наступним принципом: котушкою збудження, по якій пропускається змінний чи пульсуючий струм у провідному об'єкті наводяться вихорові струми, а системою сигнальних котушок приймають сигнал від індукованих у об'єкті струмів. Однак, вищу точність мають МЧМ, основною відмінністю яких є те, що вони можуть знаходити тільки феромагнітні об'єкти. Такі об'єкти мають або власне магнітне поле, або спотворюють однорідне магнітне поле Землі. І у тому, і у іншому випадку величина магнітного поля у зоні чутливого елемента змінює свою величину і напрям.

Основним параметром металошукача є його чутливість, або максимальна дальність знаходження об'єкта. Для МЧМ чутливість визначається величиною магнітної індукції поля, яку здатен зареєструвати прилад. Крім чутливості для

оцінки якості МЧМ використовують такий параметр як роздільна здатність, що визначає ту мінімальну різницю магнітної індукції, яку можна зареєструвати. Сучасні магнітометри мають чутливість від 0,01 нТ до 1000 нТ у залежності від принципу дії. При цьому чутливість і надійність пошуку дуже залежать від правильної конструкції та якості виготовлення магніточутливих давачів.

У сучасній техніці вимірювання напруженості магнітного поля широко використовуються магнітомодуляційні (ферозондові) перетворювачі (ФП) - пристрої, що складається з одного чи двох осердь з високопроникних магнітом'яких матеріалів, обмотки на яких розподілені по їх довжині. Принцип дії ФП заснований на періодичній зміні магнітної проникності осердь за допомогою допоміжного змінного магнітного поля. У обмотці, що розміщена на осерді, індукується несинусоїдальна ЕРС, яка змінюється з частотою допоміжного поля. Частотний спектр цієї ЕРС і амплітуди окремих гармонік залежать від напруженості зовнішнього магнітного поля, що діє на ФП.

При проектуванні каналу інформаційно-вимірювальної системи (ІВС) з ФП до його складу повинен входити ферозонд з системою обв'язки [2]. Працює ферозонд наступним чином. З генератора на обмотку збудження подається сигнал збудження з частотою  $f$ . З цього ж генератора сигнал з подвоєною частотою  $2f$  подається на синхронний детектор. З сигнальної обмотки сигнал з інформацією про виміряне магнітне поле поступає на смуговий фільтр, де з нього виділяється друга гармоніка. Далі сигнал з подвоєною частотою збудження надходить на синхронний детектор, у якому два сигнали змішуються. Напруга, що пропорційна похибці слідкування надходить на фільтр, де виділяється та смуга частот, яка відповідає за магнітне поле об'єкта.

Функціональна схема ІВС для безконтактної діагностики підземних комунікацій наведена на рис. 1. До неї входять два канали для виявлення та діагностики металевих трубопроводів та кабельних мереж, а також третій канал для виявлення неметалевих комунікацій.

Канал діагностики металевих трубопроводів містить такі блоки: блок ферозондів (БФ), попередні підсилювачі сигналу (ППС1) та (ППС2), смугові фільтри (СФ1), (СФ2), синхронні детектори (СД1), (СД2), диференційний підсилювач (ДП), мікроконтролер (МК), клавіатура (КЛ), графічний дисплей (ГД), інтерфейс (ІН), блок живлення (БЖ), генератор (Г), резонансний фільтр (РФ), підсилювач потужності (ПП). При діагностиці феромагнітних об'єктів канал працює таким чином. З Г через РФ та і ПП синусоїдальний сигнал надходить на обмотки збудження БФ TV1 та TV2. Один ферозонд розміщується ближче до землі, а другий далше на фіксованій відстані один від одного. Сигнал з інформацією про магнітні властивості об'єкта знімається з сигнальних обмоток ФП і підсилюється ППС1 та ППС2. Звідти сигнали надходять на СФ1 і СФ2, де з них виділяється друга гармоніка. З виходу СФ1 і СФ2 сигнали подаються на входи СД1 та СД2. На другі їх входи подається сигнал від Г з подвоєною частотою збудження  $2f$ . У СД1 та СД2 два сигнали змішуються та

фільтруються, а результуючі сигнали подаються на входи ДП, вихід якого під'єднано до входу АЦП МП, який здійснює обробку сигналів.

При відсутності об'єкта у полі пошуку каналу сигнали на виходах СФ1 і СФ2 матимуть однакові значення, що рівні значенню сигналу з подвоєною частотою  $\Gamma 2f$ . У результаті змішування в СД на їх виходах будуть практично нульові значення сигналів, а значить нульовий рівень сигналу буде і на виході ДП. МП обробить вхідний сигнал і подасть команду на ГД видавати 0. При цьому у зумер ВФ1 звуку видавати не буде. Коли ж у полі пошуку з'явиться феромагнітний об'єкт, то на виходах сигнальних котушок ферозондів з'явиться сигнал з рівнем другої гармоніки, який буде тим більшим, чим ближче залягає об'єкт до поверхні землі. Тоді на входах СД рівень сигналу відрізнятиметься від сигналу генератора з частотою  $2f$ , а отже на їхніх виходах з'явиться напруга похибки слідкування. Ця напруга на виході кожного СД буде різною, внаслідок різної відстані ферозондів до об'єкта досліджень, а отже з'явиться напруга різниці на виході ДП. Ця інформація буде оцифрована і оброблена у МП, який дасть команду на ГД видавати реальне значення напруженості магнітного поля. У навушниках, при цьому, з'явиться звуковий тон з частотою 300 – 500 Гц.

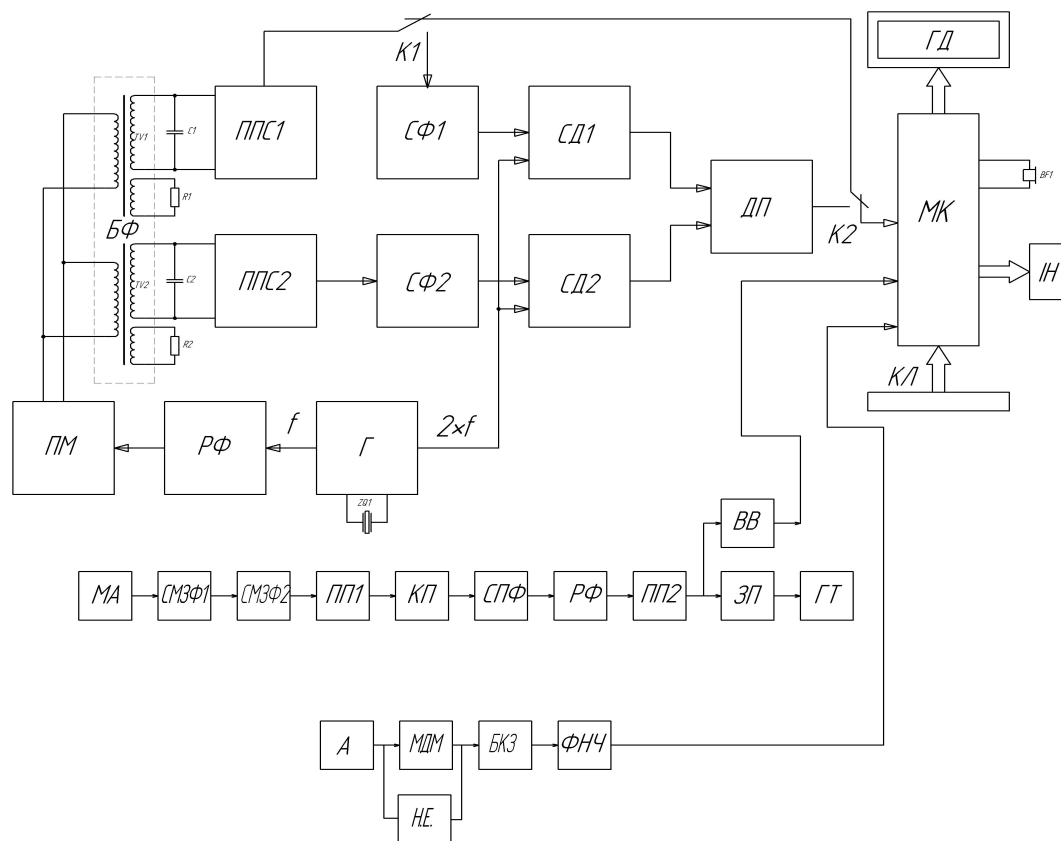


Рис. 1. Функціональна схема ІВС для безконтактної діагностики підземних комунікацій

При діагностиці неферомагнітних комунікацій канал працює так. Ключами К1 та К2 з вимірювального тракту виключаються СФ1, СД1 та ДП. При цьому використовується тільки одна частина сигнальної обмотки ферозонда. Оскільки

на ферозонд подається напруга збудження від генератора, то він працюватиме як індуктивний контур металошукача. Внаслідок того, що частота збудження ферозонда є досить високою, частота сигнальної обмотки буде зміщуватись в зону високих частот при наближенні до неферромагнітного об'єкта і у зону низьких – при наближенні до ферромагнітного. Через те, що ферозонд практично не сприймає низьких частот, канал фіксуватиме тільки об'єкти з неферромагнітними властивостями.

Канал для діагностики кабельних мереж може бути використаний як для пошуку місць пошкоджень, так і у процесі проведення випробувань на міцність ізоляції кабельних ліній. До нього входять: магнітна антена (МА), смугозагороджувальні фільтри (СМЗФ1), (СМЗФ2), смугопропускаючий фільтр (СПФ), резонансний фільтр (РФ), попередні підсилювачі сигналу (ПП1), (ПП2), керований підсилювач (КП), звуковий підсилювач (ЗП), вимірювальний випростовувач (ВВ), пристрій індикації (ПІ), головні телефони (ГТ). Працює канал наступним чином. Сигнал з МА надходить на СМЗФ1, СМЗФ2 з різними частотами смуг загородження, які вирізають частоти завади перед і після смуги з робочою частотою, підвищуючи цим завадостійкість сигналу, підсилення якого здійснює ПП1. Для отримання оптимального співвідношення сигнал/завада використовується КП із змінним коефіцієнтом підсилення напруги. Далі сигнал для виділення робочої смуги частот надходить на СПФ, а для точного виділення робочої частоти – на РФ. Після РФ сигнал підсилюється ПП2. Далі інформаційний сигнал роздвоюється: одна його частина поступає на ЗП, а звідти – на ГТ; інша частина сигналу випростовується ВВ і надходить на АЦП МК для опрацювання та індикації.

При такій компоновці каналу оператор може здійснювати контроль одночасно за гучністю звуку у головних телефонах і за показами індикатора.

Третій вимірювальний канал повинен знаходити такі неметалеві підземні комунікації як газо- та водопроводи, виготовлені з поліетилену чи пластмас. Ці комунікації не впливають на складові електромагнітного поля, тому їх дуже важко виявити. Для виявлення таких комунікацій найбільш інформативнішим є метод селективного вимірювання електричного поля ґрунту над трубопроводом. Зафіксувати електричну аномалію можна дуже чутливим селективним сенсором, який здатен зреагувати на потенціал величиною  $10^{-10}$  В.

Функціональна схема каналу для знаходження неметалевих комунікацій наведена на рис. 1. До складу каналу входять: електрична антена (А), модулятор-демодулятор сигналів низької частоти електричного поля ґрунту (МДМ), нелінійний перетворюючий елемент (НЕ), блок корекції впливу магнітного поля землі (БКЗ), фільтр низької частоти (ФНЧ). Сигнал з виходу вимірювального каналу подається на мікроконтролер МК для обробки.

Працює канал так. Електрична аномалія, що несе інформацію про місцезнаходження неметалевої комунікації, фіксується коаксіальною електричною антеною А та, для підвищення точності обробки, надходить на МДМ та НЕ. Вимірювання здійснюються шляхом модуляції низькочастотних

коливань (7-15 кГц) височастотними (300-500 кГц) з подальшим детектуванням та фільтрацією для виділення корисних властивостей сигналу. Після корекції БКЗ і фільтрації ФНЧ сигнал, підсилений у кілька мільйонів разів надходить на МК для обробки та індикації.

За допомогою описаних підходів та розробленої функціональної схеми створено ІВС, яка може знаходити підземні комунікації будь-якого виду та здійснювати їх безконтактну діагностику з метою оцінки технічного стану комунікацій, шляхом визначення ступеня відхилень від вимірних параметрів. Безконтактні вимірювання дозволяють підвищити продуктивність контролю.

*Ключові слова:* інформаційно-вимірювальна система, діагностика, підземна комунікація, вимірювальний канал.

#### **Література**

- [1] І. Р. Ващишак, С. П. Ващишак, О. М. Карпаш. «Розроблення інформаційно-вимірювальної системи для контролю підземних теплових мереж», *Методи та прилади контролю якості*, № 27, с. 39-43, 2011.
- [2] І. Р. Ващишак, С. П. Ващишак, А. В. Яворський. «Безконтактне виявлення місць витоків у підземних тепломережах безканальної прокладки», *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*, №2/47, с. 113-120, 2013.

УДК 621.3.08

### **РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИКИ ТА ПІДБІР ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ ДЛЯ ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЮ ВЖИВАНИХ ФОТОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ З МЕТОЮ ЇХ ВТОРИННОГО ВИКОРИСТАННЯ**

*Васечко В. Б., Яворський А. В., Диндин М. М.*

*Івано-франківський національний технічний університет нафти і газу*

*Івано-Франківськ, Україна*

*E-mail:* [valentyn.vasechko@ukd.edu.ua](mailto:valentyn.vasechko@ukd.edu.ua); [andrii.yavorskyi@nung.edu.ua](mailto:andrii.yavorskyi@nung.edu.ua); [mariia.dyndyn-ive211@nung.edu.ua](mailto:mariia.dyndyn-ive211@nung.edu.ua)

Глобальна встановлена потужність сонячних фотоелектричних систем (ФЕС) зазнала експоненціального зростання, позиціонуючи ФЕС як ключову технологію для пом'якшення наслідків зміни клімату та підвищення енергетичної безпеки. Однак таке стрімке зростання породжує значну проблему: управління фотоелектричними модулями, що відпрацювали свій термін експлуатації. Прогнози оцінюють обсяги відходів фотоелектричних модулів у найближчі десятиліття, які потенційно можуть сягнути 78 мільйонів тонн у світі до 2050 року за деякими оцінками [2], а за іншими - понад 200 мільйонів тонн [1]. Ця проблема відпрацьованих модулів вимагає проактивних і сталих стратегій управління, що виходять за рамки звичайної утилізації або суто руйнівної переробки.

Це дослідження пропонує структурований підхід до оцінки використаних фотоелектричних модулів з метою їх повторного використання і зменшення відходів промисловості. Воно також підкреслює неспівпадіння заявлених

виробником характеристик з фактичними результатами вимірювань, що робить перевірку в польових умовах критично важливою. Відсутність спеціальних міжнародних норм для повторного використання фотоелектричних модулів створює виклики і можливості. Дослідження зазначає, що потрібна незалежна, надійна методологія оцінки, яка може зробити цінний внесок у стандартизацію і сприяти використанню відновлювальної енергії. Зокрема було розглянуто ключові методи неруйнівного експрес контролю фотоелектричних модулів: включаючи візуальний огляд, відстеження I-V кривих, інфрачервону термографію, електролюмінесцентну візуалізацію, випробування опору ізоляції.

Неруйнівний контроль охоплює ряд методів, що використовуються для оцінки властивостей і стану матеріалів або компонентів без заподіяння їм шкоди. У контексті повторного використання фотоелектричних модулів неруйнівний контроль має важливе значення, оскільки він дозволяє оцінити електричні характеристики, цілісність і фізичні дефекти, зберігаючи при цьому потенціал модуля для другого життя. У фотоелектричній промисловості застосовуються різноманітні методи неруйнівного контролю, від простого візуального огляду до складної візуалізації та електричних вимірювань.

«Експрес-контроль» означає процес швидкого оцінювання, призначений для ефективного оцінювання використаних фотоелектричних модулів у польових або наближених до польових умовах (наприклад, центри збору, об'єкти реконструкції). Ключовими характеристиками такого процесу повинні бути:

- *Швидкість*: Мінімізація часу оцінки модуля для ефективного оброблення великих обсягів.
- *Портативність*: Обладнання має бути легко переносним і адаптованим до польових умов.
- *Низька вартість*: Економічність у витратах забезпечує доступність процесу для широкого використання.
- *Достатня точність*: Методи оцінки повинні достовірно ідентифікувати дефекти та оцінювати продуктивність для безпечного повторного використання.
- *Відповідне виявлення дефектів*: Методи оцінки мають виявляти важливі дефекти та ознаки деградації, критичні для продуктивності та безпеки модуля.

Оцінка кожного методу неруйнівного контролю за цими критеріями підсумована нижче.

**1. Візуальний контроль:** Швидкий, економічний і портативний метод, придатний для первісної перевірки, але обмежений низькою точністю у виявленні внутрішніх дефектів.

**2. Відстеження вольт-амперних характеристик (I-V кривих):** Забезпечує помірну швидкість і точність, з хорошою портативністю, але обмежене

здатністю локалізації дефектів і чутливістю до змін умов середовища, зокрема залежить від інсоляції та освітленості досліджуваної панелі.

**3. Інфрачервона термографія:** Швидкий для великих площ за допомогою дронів; високою якісною, але низькою кількісною точністю, вимагає специфічних умов для оптимальних результатів. Найкраще виявляє гарячі точки, ефекти неузгодженості і потенційні проблеми з шунтувальними діодами [3].

**4. Електролюмінесцентна візуалізація:** Як правило, повільний через час налаштування і вимоги до умов освітлення. Вартість обладнання висока (чутлива камера, джерело живлення). Портативність польових систем від помірної до низької. Точність і роздільна здатність для виявлення мікротріщин і дефектів є високими [4]. Має високу точність у виявленні мікротріщин, але є повільним і дорогостоящим методом з обмеженою портативністю і практичністю у польових умовах.

**5. Випробування опору ізоляції:** Помірна швидкість, висока портативність і достатньо точна для базових перевірок безпеки; добре підходить для польових умов із мінімальною чутливістю до зовнішнього освітлення.

**6. Ультрафіолетова флуоресценція (EL/UVF):** Помірно швидкий, з потенційно помірною вартістю обладнання; хороша портативність із якісною точністю, специфічний для виявлення матеріальної деградації, але може вимагати особливих умов освітлення для ефективності [3].

Цей порівняльний аналіз чітко показує, що такі методи, як візуальний огляд, відстеження вольт-амперних кривих, інфрачервона термографія та випробування опору ізоляції пропонують найкраще поєднання швидкості, портативності, економічної ефективності та відповідних можливостей виявлення дефектів для протоколу швидкої польової оцінки.

На основі цього аналізу пропонується методика послідовного експрес-контролю:

**1. Візуальний огляд та реєстрація даних:** Початковий скринінг на наявність критичних недоліків безпеки та збір даних.

**2. Випробування опору ізоляції:** Обов'язкова перевірка безпеки.

**3. Інфрачервона термографія:** Швидкий тепловий скринінг для виявлення гарячих точок і аномалій.

**4. Відстеження I-V кривих:** Кількісна оцінка продуктивності та розрахунок деградації.

**5. (Необов'язково) EL/UVF:** Вторинна детальна перевірка для неоднозначних випадків.

Ця послідовність надає пріоритет безпеці та ефективності, фільтруючи модулі за трьома категоріями: Категорія А (придатність до тривалого повторного використання), Категорія В (вторинне повторне використання/ремонт) і Категорія С (переробка).

Оцінка різних методів неруйнівного контролю виявила їхні взаємодоповнюючі сильні і слабкі сторони для польової оцінки. Візуальний огляд, відстеження кривих I-V, інфрачервона термографія і випробування опору

ізоляції мають найбільш потенціал придатності для експрес-контролю завдяки їхньому балансу швидкості, портативності, вартості і здатності виявляти критичні показники безпеки і продуктивності. Такі методи, як електролюмінесценція, надають цінну інформацію, але мають практичні обмеження для швидкого розгортання в польових умовах. Критичні показники для повторного використання охоплюють як безпеку (опір ізоляції, відсутність критичних фізичних пошкоджень/гарячих точок), так і продуктивність (в першу чергу, деградація  $R_{max}$  відносно паспортних даних).

**Ключові слова:** Фотоелектричні модулі, деградація, повторне використання, експрес-контроль, неруйнівний контроль.

**Література:**

- [1] Status of PV Module Recycling in Selected IEA PVPS Task 12 Countries / K. Komoto та ін. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2022. [Online]. Available: <https://doi.org/10.2172/2308819>.
- [2] IEC Technical Report for reuse of PV modules and circular economy, CEB-BEC, 28 березня 2024. [Online]. Available: <https://www.ceb-bec.be/nl/nieuws/iec-technical-report-for-reuse-of-pv-modules-and-circular-economy> (дата звернення: 25.04.2025)/
- [3] S. Kaplanis, E. Kaplani, P. N. Borza, “PV Defects Identification through a Synergistic Set of Non-Destructive Testing (NDT) Techniques”, *Sensors*, vol. 23, no. 6, 3016, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23063016> (дата звернення: 25.04.2025).
- [4] From Indoor to Daylight Electroluminescence Imaging for PV Module Diagnostics: A Comprehensive Review of Techniques, Challenges, and AI-Driven Advancements / R. del Prado Santamaría та ін. *Micromachines*, vol. 16, no. 4, 437, 2025. <https://doi.org/10.3390/mi16040437> (дата звернення: 25.04.2025).
- [5] H. Al Mahdi та ін., “A Review of Photovoltaic Module Failure and Degradation Mechanisms: Causes and Detection Techniques”, *Solar*, vol. 4, no. 1, pp. 43–82, 2024. URL: <https://doi.org/10.3390/solar4010003> (дата звернення: 25.04.2025).
- [6] M. Waqar Akram та ін. “Failures of Photovoltaic modules and their Detection: A Review”, *Applied Energy*, vol. 313, 118822, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118822> (дата звернення: 25.04.2025).
- [7] A. Firman та ін. “Photovoltaic Qualification and Approval Tests”, *Standards*, vol. 2, no. 2, с. 136–156, 2022. <https://doi.org/10.3390/standards2020011> (дата звернення: 25.04.2025).
- [8] J. Zhao та ін. “Review of State Estimation and Remaining Useful Life Prediction Methods for Lithium–Ion Batteries”, *Sustainability*, vol. 15, no. 6, 5014, 2023. <https://doi.org/10.3390/su15065014> (дата звернення: 25.04.2025).
- [9] J. Kim та ін. “A Review of the Degradation of Photovoltaic Modules for Life Expectancy”, *Energies*, vol. 14, no. 14, 4278, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14144278> (дата звернення: 25.04.2025).
- [10] Y. Zefri та ін. “Thermal Infrared and Visual Inspection of Photovoltaic Installations by UAV Photogrammetry—Application Case: Morocco”, *Drones*, vol. 2, no. 4, С. 41, 2018. <https://doi.org/10.3390/drones2040041> (дата звернення: 25.04.2025).

УДК 006.91+681.2.08

## ПРОБЛЕМИ ПРОСТЕЖНОСТІ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ У СФЕРІ МЕДИЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Тарасенко Є. В.

ДП «Укрметртестстандарт», Київ, Україна

E-mail: [etarasenko@ucsm.com.ua](mailto:etarasenko@ucsm.com.ua)

Забезпечення життя здоров'я громадян є одним з найпріоритетніших завдань сучасного світу. Клінічна діагностика є невід'ємною частиною лікування чи профілактики захворювань. В основі правильної клінічної діагностики лежить точне вимірювання параметрів біоматеріалу людини. Багато національних та міжнародних науково-дослідних організацій працюють над забезпеченням точності та простежності вимірювань в медицині та біології. Втім сьогодні інструментальні можливості вимірювальної техніки для клінічної діагностики випереджають результати напрацювань наукової спільноти з методології проведення вимірювань характеристик біоматеріалу людини та забезпечення простежності результатів біохімічних, гематологічних, імунологічних та інших вимірювань.

Добре відома проблема полягає у тому, що результати вимірювань одних і тих самих значень характеристик біоматеріалу людини за допомогою обладнання різних виробників можуть суттєво різнитись між собою. Для вимірювання однієї і тієї ж характеристики біоматеріалу людини різні виробники обладнання для діагностичних лабораторій можуть використовувати різні технологічні рішення та фізичні принципи. Вимірювання виконуються після складних хімічних перетворень зразка з використанням різних реагентів. Отже, результати подібних вимірювань часто виявляються несумісними для порівняння, навіть якщо вони подані в однакових одиницях.

Простежність результатів вимірювань характеристик біоматеріалу забезпечується через сертифіковані референтні матеріали (CRM) [1]. Використання CRM дозволяє знайти параметри переходу від власних робочих шкал приладів різних виробників до референтної шкали, як це рекомендовано в ISO 17511 [2]. На жаль досить мала номенклатура показників біоматеріалу людини забезпечена CRM. Забезпечення простежності результатів вимірювання референтними та діагностичними лабораторіями стикається з труднощами через відсутність CRM, їх вартість або складність транспортування чи зберігання. Наразі до Міжнародної бази даних Об'єднаного комітету з простежності в лабораторній медицині International Database of Joint Committee for Traceability in Laboratory Medicine (JCTLM Database) включено більше ніж 290 сертифікованих референтних матеріалів та більше ніж 240 референтних методів вимірювань найвищої ланки в ланцюгах простежності [3]. Це відносно невелика частина показників біоматеріалу людини, які вимірюються

діагностичними лабораторіями та використовуються для діагностування, лікування чи призначення методів профілактики для пацієнтів.

Виробники обладнання для діагностичних лабораторій забезпечують локальну простежність за допомогою вироблених ними зразків контрольних матеріалів для контролю свого обладнання. Як правило, контрольні матеріали одного виробника не можна використовувати для вимірювань на обладнанні інших виробників. Зразки контрольних матеріалів не є сертифікованими референтними матеріалами і не можуть підтримувати простежність вимірювань, а тільки є індикаторами того, що покази приладу знаходяться в певних межах.

Міжлабораторні порівняння результатів вимірювань в клінічній діагностиці організовуються локально такими організаціями, як Prevecal [4], RIQAS [5] та іншими. Як правило, при організації подібних міжлабораторних порівнянь не використовують CRM, тому організатори далеко не завжди впроваджують простежність вимірювань в класичному розумінні. Під час таких порівнянь вимірювання виконані на обладнанні різних виробників групуються та обробляються окремо. При цьому не ставиться завдання оцінити параметри переходу від показів одного виробника до іншого.

Усереднення величини одного роду для великої кількості приладів всіх виробників може дати локальну тимчасову референцію, відносно якої за відсутності CRM або референтних методів можуть бути одержані зсуви вимірювань приладами та групами приладів. Саме така процедура, яка названа гармонізацією, у загальному вигляді передбачена у підрозділі 5.6 ISO 17511 [2] та більш докладно представлена у ISO 21151 [6]. Таке рішення вимагає постійного перегляду комутабельності та гармонізаційної поправки через постійну появу нових методик та модифікацію обладнання. Це породжує необхідність регулярного моніторингу гармонізованої системи.

Не доводиться сподіватися на вирішення найближчим часом проблеми постачання кожній діагностичній лабораторії дешевих та стабільних CRM за кожним показником, який вона вимірює в своїй повсякденній практиці. В той же час застосування зразків біоматеріалу людини у якості зразків для вимірювань разом з зразками іншого походження є сталою практикою для внутрішніх процедур систем якості лабораторій [7, 8].

Для вирішення проблеми простежності та порівнянності результатів вимірювань характеристик біоматеріалу людини діагностичними лабораторіями пропонується математична модель спільної обробки великих масивів взаємопов'язаних вимірювань параметрів біоматеріалу людини. Вона дає змогу оцінити систематичні та випадкові складові похибок як окремих приладів, так і груп різних типів обладнання від різних виробників. Це забезпечить порівнянність усіх вимірюваних характеристик та дозволить оцінювати невизначеність результатів щодо встановлених референцій. Запропонована математична модель розвиває рекомендації ISO 21151 [6]. Одна з ключових переваг полягає в тому, що математична модель підходить для обробки

будь-яких комбінацій вимірювань за ієрархічними схемами простежуваності згідно з ISO 17511 [2]. Також запропонований мережевий підхід до збору даних, що дозволяє зробити моніторинг гармонізованої системи швидким та гнучким за рахунок використання новітніх мережевих технологій обробки даних. Найчастіше міжлабораторні порівняння проводяться за радіальною схемою [9]. В дослідженні пропонується проводити вимірювання за схемою Мережі метрологічних вимірювань (ММВ) [10]. ММВ розглядається як майбутня організаційна основа для вимірювань, які дозволять відносно просто запровадити горизонтальні зв'язки між діагностичними лабораторіями та вертикальні зв'язки між національними метрологічними інститутами, різними дослідницькими інституціями, виробниками приладів, референтними та діагностичними лабораторіями. Сумісна обробка великих масивів вимірювань дозволить оцінити характеристики усіх партій зразків і параметри всіх приладів, задіяних у вимірюваннях у межах мережі, відносно призначених у ній референтних значень практично в найкоротші терміни.

*Ключові слова:* вимірювання, простежність, клінічна діагностика, міжлабораторні порівняння, гармонізація.

**Література:**

- [1] International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), 3rd ed., JCGM 200:2012.
- [2] ISO 17511:2020, In vitro diagnostic medical devices — Requirements for establishing metrological traceability of values assigned to calibrators, trueness control materials and human samples.
- [3] JCTLM Database. [Online]. Available: <https://www.jctlmdb.org/#/app/home>
- [4] Prevecal International External Quality Assessment Scheme. [Online]. Available: <https://www.prevecal.net/default/en>
- [5] RIQAS – Randox International Quality Assessment Scheme. [Online]. Available: <https://riqasconnect.randox.com/riqas/default.asp>
- [6] ISO 21151:2020, In vitro diagnostic medical devices — Measurement of quantities in biological samples — Requirements for international harmonization protocols intended to establish equivalence or harmonization of measurement results.
- [7] Clinical and Laboratory Standards Institute, Measurement Procedure Comparison and Bias Estimation Using Patient Samples, EP09c, 3rd ed., Wayne, PA, USA, 2018.
- [8] Westgard QC – Tools, Technologies and Training for Healthcare Laboratories. [Online]. Available: <https://westgard.com/>
- [9] Bureau International des Poids et Mesures, Measurement Comparisons in the CIPM MRA: Guidelines for Organizing, Participating and Reporting, CIPM MRA-G-11, Ver. 1.1, Jan. 18, 2021. [Online]. Available: <https://www.bipm.org/documents/20126/43742162/CIPM-MRA-G-11.pdf>
- [10] O. Samoilenko, S. Pronenko, Y. Tarasenko, and O. Dengub, "Traceability ensuring for measurements of the physical and/or chemical characteristics of human blood by organizing the Metrological Measurements Network," *Measurement: Sensors*, 101514, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101514>

УДК 612.

## **ЕЛЕКТРОННИЙ РЕЄСТР РОБОЧИХ ЕТАЛОНІВ ОБ’ЄМУ ГАЗУ (ПОВІРОЧНИХ УСТАНОВОК)**

*Бас О. А., Середюк Д. О., Пелікан Ю. Т., Лемішка В. І., Гулик В. Я., Мануляк Р. Т.  
ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», Івано-Франківськ, Україна  
E-mail: [alexandr.sanya@gmail.com](mailto:alexandr.sanya@gmail.com)*

У відповідності до Статті 27 Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність» [1], калібруванню підлягають вторинні та робочі еталони. Робочий еталон – це еталон, який використовується для регулярних калібрувань або повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки. Згідно з «Порядком калібрування вторинних та робочих еталонів» [2], калібрування робочих еталонів проводять: наукові метрологічні центри, які мають міжнародно визнані калібрувальні та вимірювальні можливості (СМС – рядки) за відповідними видами та підвидами вимірювань із застосуванням національних еталонів. ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТ-МЕТРОЛОГІЯ», як науковий метрологічний центр, є організацією – зберігачем національних первинних та вторинних еталонів одиниць об’єму та об’ємної витрати газу, який занесений до Баз даних проведених звірень національних еталонів Міжнародного бюро мір та ваг (KCDV BIPM) з ідентифікатором СМС – рядків під шифрами UA1 – UA4 в діапазоні об’ємної витрати газу від 0,016 м<sup>3</sup>/год до 7800 м<sup>3</sup>/год.

Також калібрування робочих еталонів дозволяється здійснювати калібрувальним лабораторіям (КЛ), які акредитовані Національним агентством з акредитації України (НААУ) на відповідність вимогам ДСТУ EN ISO/IEC 17025 [3], згідно сфери акредитації. Калібрування робочих еталонів повинно проводитися згідно з методиками калібрування, які містяться в національних стандартах або розроблені калібрувальними лабораторіями з урахуванням національних стандартів, гармонізованих з відповідними міжнародними та європейськими стандартами, та документів, прийнятих міжнародними та регіональними організаціями з метрології (EURAMET).

Тобто, під час підтвердження технічної компетентності і кваліфікації лабораторії в межах проведення процедури акредитації НААУ, в сфері акредитації КЛ не вимагається зазначати окремим пунктом, що об’єктом калібрування є «робочі еталони, які застосовуються у сфері законодавчо регульованої метрології» із застосуванням методики калібрування, вимоги до якої вищезазначені. Однак, більш доцільніше виділити в сфері акредитації КЛ окремо робочі еталони від засобів вимірювальної техніки, які підлягають калібруванню в добровільному порядку. Наразі це питання не врегульовано на нормативно-правовому рівні і потребує доповнень чинного Порядку [2].

Згідно вимог стандарту [4] та методик повірки на лічильники газу [5 – 7], робочим еталоном є установка для повірки лічильників газу. В Україні

застосовуються, зазвичай, установки таких типів: дзвонового, з еталонними лічильниками, із критичними соплами, PVt та комбіновані з поєднанням декількох типів.

В сертифікаті калібрування робочого еталона об'єму газу (повірочної установки) наводиться міжкалібрувальний інтервал робочого еталона – 1 рік, згідно Порядку [2] та висновок щодо відповідності робочого еталона метрологічним вимогам в частині забезпечення значення розширеної невизначеності не більше  $1/3$  від значення максимально допустимої похибки [8] і можливості його застосування для проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки – лічильників газу класу точності 1,0 % та/або 1,5 %.

ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ» з метою забезпечення та підтвердження метрологічної простежуваності, запроваджено ведення електронного Реєстру робочих еталонів об'єму та об'ємної витрати газу – установок для повірки лічильників газу (наказ від 10.02.2025 № 103), що простежуються до національного первинного еталона одиниць об'єму та об'ємної витрати газу ДЕТУ 03-01-15 та вторинних еталонів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу. В Реєстрі, який розміщений на головній сторінці веб-сайту підприємства [9], зазначено наступні дані:

- назва або умовне позначення еталона (повірочної установки), заводський номер еталона;
- адреса розташування еталона;
- підприємство – власник;
- виробник еталона;
- діапазон значень об'ємної витрати газу;
- реквізити сертифікату калібрування робочого еталона.

В електронному Реєстрі доступна можливість здійснення сортування його по регіону розташування (область), а також можливість проведення верифікації щодо чинності Сертифікату калібрування (див. в колонці «Статус», де зеленим кольором виділено чинні Сертифікати, а червоним – ті, термін дії яких вийшов).

Робочий еталон, занесений до Реєстру, дає можливість державним підприємствам, які належать до сфери Мінекономіки, повірочним та калібрувальним лабораторіям підтвердити: присвоєне значення розширеної невизначеності результатів вимірювання, отримане під час калібрування та ланцюг простежуваності до національних еталонів одиниць об'єму та об'ємної витрати газу.

Простежуваність робочих еталонів забезпечується шляхом безпосереднього калібрування або звірення фахівцями ДП «ІВАНО-ФРАНКІВСЬКСТАНДАРТМЕТРОЛОГІЯ» із застосуванням комплексу еталонів передавання згідно із розробленими методиками калібрування.

На рис. 1 представлено умовну схему простежуваності засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу в Україні, в якій кінцевий споживач має можливість відслідкувати увесь ланцюг калібрування та, відповідно,

простежуваність свого ЗВТ до національних первинного та вторинних еталонів, які, як зазначалося, занесені до Баз даних Міжнародного бюро мір та ваг (KCDB BIPM).



Рис. 1. Схема метрологічної простежуваності засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу в Україні

Дана ініціатива спрямована на забезпечення єдності вимірювань у сфері обліку природного газу в Україні та гарантування всім учасникам ринку природного газу достовірних результатів вимірювань, що здійснюються за допомогою лічильників газу і, в кінцевому результаті, раціонального використання коштів споживачів природного газу.

**Ключові слова:** реєстр, робочий еталон, установка, об'єм, об'ємна витрата, природний газ, невизначеність, калібрування.

#### Література

- [1] Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність». [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1314-18#Text>
- [2] Порядок калібрування вторинних та робочих еталонів, затверджено Наказом Мінекономрозвитку від 10.08.2020р. № 1518. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1000-20#Text>
- [3] ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019 Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (EN ISO/IEC 17025:2017, IDT; ISO/IEC 17025:2017, IDT).
- [4] ДСТУ 3383:2015 Метрологія. Державна повірочна схема для засобів вимірювання об'єму та об'ємної витрати газу.
- [5] ДСТУ 9033:2020 Метрологія. Лічильники газу турбінні. Методика повірки.
- [6] ДСТУ 9035:2020 Метрологія. Лічильники газу для побутових потреб та комерційного обліку. Методика повірки.
- [7] ДСТУ 9036:2020 Метрологія. Лічильники газу ультразвукові. Методика повірки.
- [8] Порядок проведення повірки законодавчо регульованих засобів вимірювальної техніки, що перебувають в експлуатації, та оформлення її результатів, затверджений Наказом Мінекономрозвитку від 08.02.2016р. № 193. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0278-16#Text>
- [9] Реєстр робочих еталонів. Режим доступу: <https://ifdcsmis.com.ua/uk/flowstandards/>.

УДК 681.518

## ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОЇ ОБРОБКИ СИГНАЛІВ ПРИ ПРОВЕДЕННІ БАГАТОПАРАМЕТРИЧНИХ ВИМІРЮВАНЬ ВИЇЗНИМИ МЕТРОЛОГІЧНИМИ ГРУПАМИ

*Бандурка А. М., Карпаш О. М.*

*Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба,  
Харків, Україна*

*E-mail: [artembandurka16@gmail.com](mailto:artembandurka16@gmail.com)*

В останній час проходить постійне оновлення озброєння та військової техніки (ОВТ), що потребує застосування нових засобів вимірювальної техніки (ЗВТ). Така ситуація вимагає постійного удосконалення їх метрологічного забезпечення, яке є невід’ємною частиною підтримки ОВТ у справному та боєздатному стані. Одним із способів вирішення цієї задачі є використання методу багатопараметричних вимірювань на основі цифрової обробки сигналів (ЦОС) для підвищення ефективності, точності технічного стану та надійності роботи систем озброєння, зв’язку та навігації.

Суть методу багатопараметричного контролю якості функціонування інформаційно-вимірювальних систем різного призначення полягає у визначенні та урахуванні різних факторних впливів на результати вимірювань. Для цього використовуються тестові методи, методи статистичного аналізу, штучні нейронні мережі, які дозволяють забезпечити максимально високу вірогідність отриманих результатів.

Збройна агресія російської федерації призвела до збільшення кількості виїзних метрологічних груп (ВМГ), що входять до складу основних підрозділів регіональних метрологічних військових частин для проведення обслуговування, поточного та середнього ремонту відповідних систем на зразках ОВТ. Нажаль, більшість ЗВТ, що використовуються для контролю основних параметрів при здійсненні регламентних робіт є аналоговими і подекуди лише частково володіють необхідними технічними та метрологічними характеристиками.

ЦОС відіграє ключову роль у багатопараметричних вимірюваннях характеристик періодичних сигналів, забезпечуючи високу точність, швидкість і надійність аналізу. Для якісного метрологічного забезпечення ЦОС має критичне значення, оскільки забезпечує ефективний моніторинг та діагностику електроенергетичних систем у польових умовах. В умовах бойових дій або при використанні мобільних енергетичних установок необхідно швидко і точно визначати параметри живлення, виявляти аномалії та попереджати можливі відмови техніки.

Одним із ключових інструментів для таких вимірювань є аналізатор якості електроенергії Fluke 435-II, який використовує ЦОС для глибокого аналізу параметрів електромережі. Він дозволяє точно визначати втрати енергії, контролювати якість електроживлення та виявляти гармонійні спотворення, що може бути критично важливим у бойових умовах. Прилади Fluke можуть

працювати в широкому діапазоні напруг і струмів, що дає можливість використовувати їх як для стаціонарних об'єктів, так і для мобільних енергетичних комплексів. Особливо критичним може бути його використання при проведенні обслуговування та ремонту переносних радіолокаційних станцій контрбатарейної боротьби типу AN/TPQ – 48, 49, 50, оскільки надійне функціонування даного зразку ОБТ можливе лише із забезпеченням відповідних стабільних характеристик електромережі живлення. З огляду на досвід проведення відповідних робіт з метрологічного обслуговування ВМГ однією з причин появи несправностей, некоректної роботи та виходу із ладу станції є саме невідповідність характеристик джерела електричного струму (потужність, напруга, сила струму, частота), тому використання аналізатора електроенергії Fluke 435-II може забезпечити швидкий та точний контроль даних параметрів.

Таким чином, цифрова обробка сигналів разом із передовими вимірювальними технологіями є важливим компонентом сучасного метрологічного забезпечення, що сприяє підвищенню надійності зразків ОБТ, їх стійкості до зовнішніх впливів та ефективності роботи ВМГ.

*Ключові слова:* багатопараметричні вимірювання, засоби, точність, контроль, метрологія електричний струм.

УДК 006.91+681.2.08

## СТАБІЛЬНІСТЬ РОБОЧОГО ЕТАЛОНА ЯК СКЛADOVA НЕВИЗНАЧЕНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ПІД ЧАС КАЛІБРУВАННЯ

*Мокійчук В. М., Редько О. О.*

*Національний технічний університет України*

*«Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», Київ, Україна*

*E-mail: [mvv-pbf@lil.kpi.ua](mailto:mvv-pbf@lil.kpi.ua), [o.redko.ua@ukr.net](mailto:o.redko.ua@ukr.net)*

Під час проведення калібрування важливим етапом є оцінювання невизначеності результатів вимірювань [1]. Однією зі складових невизначеності, якою часто необґрунтовано нехтують є стабільність робочих еталонів (РЕ). Показані варіанти оцінювання цієї складової невизначеності та джерела даних про її значення.

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

Стабільність може бути виражена як певні флуктуації результатів вимірювань або генерованих величин робочих еталонів викликані впливом навколишнього середовища та дрейфом (Рис. 1). Флуктуації можуть бути оцінені як випадкова величина і, відповідно, входять в невизначеність типу А. Дрейф доцільно розглядати як систематичну складову і застосовувати відповідні методи оцінювання. В свою чергу, дрейф рекомендовано [2] розглядати як короткотривалий та довготривалий. Короткотривалий дрейф, це дрейф який може бути присутнім під час виконання процедури калібрування,

тобто дрейф протягом кількох робочих годин, пов'язаний зі стабілізацією характеристик РЕ, прогрівом, зміною навантаження та іншими стабільно змінюваними (не випадковими) факторами. Довготривалий дрейф пов'язаний з процесами старіння еталонів (Aging Rate). Оцінка довготривалого дрейфу є функцією часу і повинна враховувати або рекомендований виробником інтервал (див. Рис. 2) [3, 4] або дані з аналізу калібрування із застосуванням, наприклад регресійного аналізу, методів прогнозування тощо.

На Рис. 1 схематично зображено структуру складових, впливні фактори та підходи до урахування складових стабільності робочих еталонів.

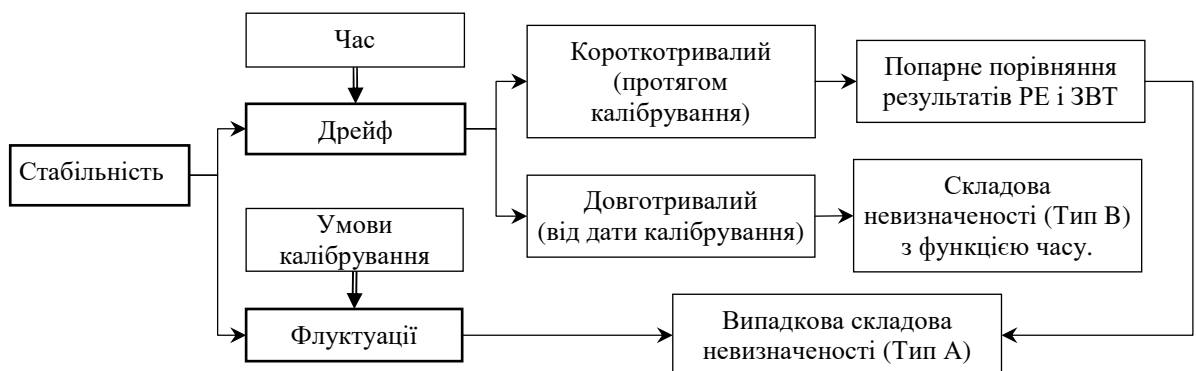


Рисунок 1. Складові стабільності робочих еталонів та їх оцінювання

Зрозуміло, що не завжди є достатньо інформації про дрейф. Джерелом такої інформації може бути документація виробника обладнання (див. Рис. 2). Наприклад, для вольтметра (Рис. 2 б) за аналізом даних можна передбачити лінійну зміну складової (%Reading) значення невизначеності від старіння.

| Internal Time Base Stability               |                                  |                                                   |
|--------------------------------------------|----------------------------------|---------------------------------------------------|
|                                            |                                  | Standard (0° to 50°C)                             |
| Temperature Stability (referenced to 25°C) |                                  | $< \pm 1 \times 10^{-6}$                          |
| Aging Rate                                 | Per Day<br>Per Month<br>Per Year | $< \pm 0.2 \times 10^{-6}$<br>$\pm 2 \text{ ppm}$ |

а)

| Range | Frequency       | 90 Day                      |   | 180 Day |       | 1 Year |       | 2 Year |   |       |       |   |       |
|-------|-----------------|-----------------------------|---|---------|-------|--------|-------|--------|---|-------|-------|---|-------|
|       |                 | $\pm$ (% Reading + % Range) |   |         |       |        |       |        |   |       |       |   |       |
| 100mV | 10Hz to 40Hz    | 0.040                       | + | 0.015   | 0.045 | +      | 0.015 | 0.05   | + | 0.015 | 0.070 | + | 0.015 |
|       | 40Hz to 200Hz   | 0.017                       | + | 0.009   | 0.019 | +      | 0.009 | 0.021  | + | 0.009 | 0.029 | + | 0.009 |
|       | 200Hz to 1KHz   | 0.014                       | + | 0.008   | 0.015 | +      | 0.008 | 0.017  | + | 0.008 | 0.024 | + | 0.008 |
|       | 1kHz to 2kHz    | 0.014                       | + | 0.008   | 0.015 | +      | 0.008 | 0.017  | + | 0.008 | 0.024 | + | 0.008 |
|       | 2kHz to 20kHz   | 0.020                       | + | 0.01    | 0.023 | +      | 0.01  | 0.025  | + | 0.010 | 0.035 | + | 0.010 |
|       | 20kHz to 100kHz | 0.048                       | + | 0.05    | 0.054 | +      | 0.05  | 0.06   | + | 0.050 | 0.080 | + | 0.050 |

б)

Рисунок 2. Приклади даних щодо стабільності робочих еталонів з документації виробників

Найпростішою функцією для врахування дрейфу буде лінійна функція часу наведена у виразі 1.

$$u_{stab} = \frac{k \cdot N_{\text{днів}}}{2\sqrt{3}}, \quad k = \frac{u_{\text{спец.}}}{N_{\text{спец.}}}, \quad (1)$$

де  $u_{\text{спец.}}$  – невизначеність за даними специфікації виробника,

$N_{\text{спец.}}$  – період часу, для якого визначено невизначеність,

коефіцієнт  $2\sqrt{3}$  передбачає рівномірний закон розподілу величини дрейфу.

Наприклад, для опорного генератора (Рис. 2 а) через 200 днів від дати останнього калібрування стандартна невизначеність від дрейфу складатиме

$$u_{stab} = \frac{2 \text{ ppm} \cdot 200}{2\sqrt{3} \cdot 365} = 0,31 \text{ ppm}.$$

## **ВИСНОВКИ**

Результати аналізування джерел з оцінювання невизначеності та документації виробників засобів вимірювань, показують необхідність урахування складової невизначеності стабільності робочих еталонів та наявності відповідної інформації у специфікації виробника.

*Ключові слова:* невизначеність, дрейф, стабільність, робочий еталон.

## **Література**

- [1]. Загальні вимоги до компетентності випробувальних та калібрувальних лабораторій (ISO/IEC 17025:2017, IDT): ДСТУ EN ISO/IEC 17025:2019. – [Чинний з 2021-01-01]. – Київ, Україна: ДП «УкрНДНЦ», 2020.
- [2]. EA- 4/02 M:2022 Expression of uncertainty in measurement for calibration. European co-operation for Accreditation. [Online]. Available: <https://european-accreditation.org/publications/ea-4-02-m>).
- [3]. Picotest U6200A Universal Counter. Manual. [Online]. Available: <https://www.picotest.com/wp-content/uploads/2024/03/U6200AU6220A-Counter-20201218.pdf>).
- [4]. Transmille 8104 Multimeter Extended Specifications. [Online]. Available: [https://www.transmille.com/file\\_upload/8104-Extended-Specifications-V1-1.pdf](https://www.transmille.com/file_upload/8104-Extended-Specifications-V1-1.pdf)).

УДК 621.316.1

## **НЕВИЗНАЧЕНІСТЬ ОЦІНЮВАННЯ ОСНОВНОЇ ЧАСТОТИ НАПРУГИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ФАЗОВИМ МЕТОДОМ**

<sup>1,2)</sup>Малько В.П., <sup>2)</sup>Ковтун С.І., <sup>2)</sup>Куц Ю.В., <sup>2)</sup>Куц В.Ю.

<sup>1)</sup>Інститут загальної енергетики НАН України, Київ, Україна

<sup>2)</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

E-mail: vovaviking03@gmail.com

Порушення режимів роботи станцій електрогенерації, дисбаланс між виробництвом та споживанням електроенергії призводять до погіршення показників якості електроенергії, які є ключовими чинниками надійності та ефективності функціонування об'єктів енергоспоживання. Якість електроенергії забезпечується шляхом дотримання постачальниками електроенергії нормованих показників якості за стандартом EN 50160:2022 [1].

Найчастіше вживаними є такі показники якості: частота напруги електропостачання, змінення напруги електропостачання, напруги гармонік та інтергармонік, сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень (СКГС) та ін. Результати вимірювання показників якості електроенергії повинні містити характеристику недостовірності вимірювань. На міжнародному рівні за таку характеристику прийнято невизначеність вимірювання. Тому розрахунок невизначеності показників якості напруги електропостачання є невід’ємною частиною аналізу якості електроенергії, що дає змогу адекватно оцінити відповідність енергопостачання встановленим стандартам.

**Метою роботи** є аналіз невизначеності оцінювання основної частоти напруги електропостачання, яке реалізується шляхом застосування фазового методу на основі дискретного перетворення Гільберта (ДПГ).

Оцінювання показників якості електроенергії, здебільшого, ґрунтується на аналізі напруги або струму електропостачання шляхом застосування дискретного перетворення Фур’є (ДПФ) або Вейвлет-перетворення. Для розрахунку невизначеності вимірювання застосовують різні методи. Наприклад в роботі [2] авторами шляхом аналітичного та імовірнісного підходу на основі методу Монте-Карло проаналізовано вплив невизначеності напруги та струму на невизначеність показників якості електропостачання. Однак застосування методу Монте-Карло зумовлює високе обчислювальне навантаження, що збільшує час обчислення невизначеності.

Іншим прикладом розрахунку невизначеності оцінювання показників якості електропостачання наведено в роботі [3]. Проведений аналіз невизначеності оцінювання активної потужності та СКГС напруги на основі GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement: First edition. — ISO, Switzerland, 1993 (GUM)). Спочатку шляхом математичного моделювання створюється модель та розраховуються фактори, які впливають на зміну напруги та фазових зсувів гармонік. Далі застосовується метод на основі GUM для об’єднання окремих факторів впливу та спрощений підхід для розрахунку коефіцієнтів кореляції.

Проведений аналіз публікацій підтвердив актуальність розглянутої тематики.

### **Постановка задачі дослідження**

Визначення основної частоти напруги електропостачання здійснюється фазовим методом на основі ДПГ. Необхідно розрахувати комбіновану стандартну невизначеність оцінювання основної частоти та проілюструвати процес її визначення шляхом проведення модельних експериментів.

Моделювання провести для наступних вихідних даних: номінальне значення амплітуди мережевої напруги  $U_n = 230$  В, номінальне значення частоти електромережі  $f_n = 50$  Гц, частота дискретизації напруги  $f_d = 12,8$  кГц, період дискретизації  $T_d = 78,125$  мкс, розрядність АЦП – 12 біт, опорна напруга АЦП  $U_{оп} = 10$  В (мережевої напруги подається на АЦП через подільник напруги 1:50), час аналізу  $T_a = 0,16$  с, обсяг вибірки  $J = 2048$ , СКВ гауссового шуму  $\sigma_\xi = 2,3$  В.

## **Методологія розрахунку невизначеності для оцінювання частоти напруги електропостачання фазовим методом**

Модель напруги електропостачання за відсутності вищих гармонік

$$u(t) = U_n \sin(2\pi f_1 t - \varphi_1) + \xi(t) = U(t) \sin \Phi(t), \quad t \in T_a \quad (1)$$

де  $U_n$  – номінальна напруга електромережі,  $f_1$  – номінальна частота електропостачання,  $\varphi_1$  – початкова фаза напруги електропостачання,  $T_a$  – час аналізу,  $\xi$  – шумова компонента,  $U(t)$  та  $\Phi(t)$  – обвідна та фаза напруги.

Аналогово-цифрове перетворення напруги електропостачання (1) дає змогу отримати її дискретну версію  $u[j]$ ,  $j = \overline{1, J}$ ,  $J = [T_a/T_d]^+$ , а застосування до цієї послідовності ДПГ – визначити гільберт-образ цієї послідовності  $\tilde{u}[j]$ .

Оцінювання фазової характеристики  $\hat{\Phi}[j]$  напруги та частоти  $\hat{f}_1$  проводиться за наступними формулами [4]:

$$\hat{\Phi}[j] = \arctg \frac{\tilde{u}[j]}{u[j]} + \frac{\pi}{2} \left\{ 2 - \text{sign}(\tilde{u}[j]) \cdot (1 + \text{sign}(u[j])) \right\} + L(\tilde{u}[j], u[j]), \quad j = \overline{1, J}, \quad (3)$$

$$\hat{f}_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\hat{\Phi}[j_2] - \hat{\Phi}[j_1]}{(j_2 - j_1)T_d} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Delta\hat{\Phi}}{\Delta t}, \quad j_1, j_2 \in [1, J], \quad (4)$$

де  $L(\cdot)$  – оператор, що забезпечує розгортання фази сигналу в часі.

Необхідне для аналізу невизначеності рівняння вимірювання частоти отримаємо з (3) та (4) у такій формі:

$$\hat{f}_1 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\arctg \frac{\tilde{u}[j_2]}{u[j_2]} - \arctg \frac{\tilde{u}[j_1]}{u[j_1]} + \frac{\pi}{2} \left\{ K(u[j_2], \tilde{u}[j_2], u[j_1], \tilde{u}[j_1]) \right\}}{(j_2 - j_1)T_d}, \quad j_1, j_2 \in [1, J], \quad (5)$$

де  $K(\cdot)$  – ціле число значень  $0,5\pi$ , які містяться у різниці фаз  $\Delta\Phi$ .

Порядок розрахунку невизначеності результату оцінювання основної частоти  $f_1$  напруги електропостачання складається з наступних етапів.

1. Побудова діаграми впливаючих факторів (діаграми Ішикави).

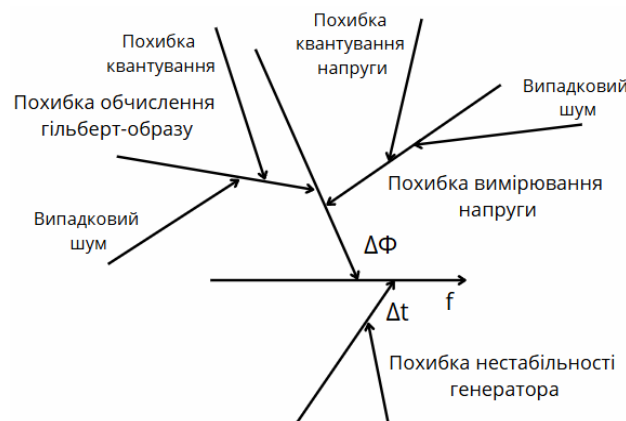


Рис. 1. Діаграма Ішикави для визначення основної частоти напруги електропостачання

2. Формування бюджету невизначеності згідно з діаграмою Ішикави.

Бюджет невизначеності для оцінювання частоти напруги електропостачання представлено в табл. 1.

Табл. 1. Бюджет невизначеності для оцінювання основної частоти

| Позначення   | СКЗ              | Впливаючий фактор                 | Категорія невизначеності | Закон розподілу імовірності | Сумарна стандартна невизначеність | Коефіцієнт впливу                                  |
|--------------|------------------|-----------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------------|
| $\Delta\Phi$ | $u_{\Delta\Phi}$ | Похибка вимірювання напруги       | В                        | Рівномірний                 | $u_{\Delta\Phi}$                  | $\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \Delta t}$             |
|              |                  | Похибка отримання гільберт-образу |                          |                             |                                   |                                                    |
| $\Delta t$   | $u_{\Delta t}$   | Похибка нестабільності генератора | В                        | Рівномірний                 | $u_{\Delta t}$                    | $-\frac{\Delta\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \Delta t^2}$ |

3. Отримання виразу для розрахунку комбінованої стандартної невизначеності. За умови некорельованості складових невизначеності маємо

$$u_f = \sqrt{\left(\frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \Delta t}\right)^2 \cdot u_{\Delta\Phi}^2 + \left(-\frac{\Delta\Phi}{2 \cdot \pi \cdot \Delta t^2}\right)^2 \cdot u_{\Delta t}^2}, \quad (6)$$

де

$$u_{\Delta\Phi}^2 = \frac{2}{U^2} \left( \frac{U_{\text{оп}}^2}{4^N \cdot 12} + \sigma_{\xi}^2 \right), \quad (7)$$

$$u_{\Delta t} = \delta(j_2 - j_1) T_d. \quad (8)$$

Застосування формул (5) – (8) ілюструє наступний приклад.

За результатами модельного експерименту отримано фазову характеристику напруги  $\hat{\Phi}[j]$ , яку наведено на рис. 2.

З рис.2 визначено:  $\hat{\Phi}[j_2] = 42,400$  рад,  $\hat{\Phi}[j_1] = 10,991$  рад,  $\Delta\hat{\Phi} = 31,412$  рад,  $j_2 = 1792$ ,  $j_1 = 512$ ,  $\Delta t = 0,100$  с,  $u[j_2] = -1,871$  В,  $\tilde{u}[j_2] = -230,100$  В.

За формулою (5) розраховане значення частоти становить  $\hat{f}_1 = 49.994$  Гц.

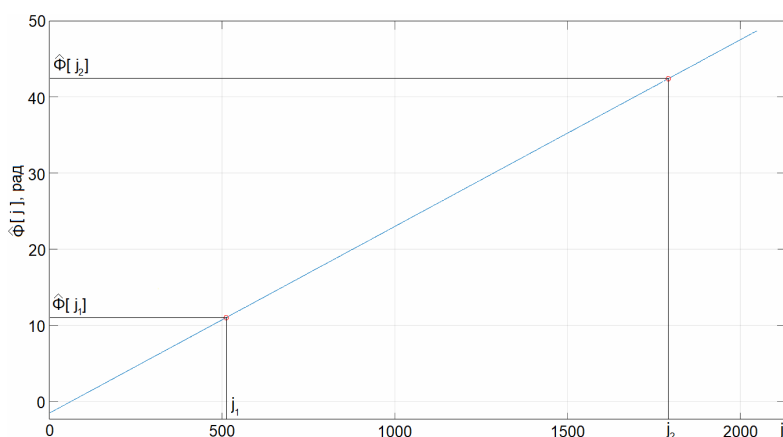


Рис. 2. Фрагмент фазової характеристики напруги електропостачання

Розрахунок комбінованої стандартної невизначеності (6) полягає у розрахунку двох вагових коефіцієнтів (табл.1), СКВ фази  $u_{\Delta\phi}$  (7) та часу  $u_{\Delta t}$  (8).

Комбінована стандартна невизначеність оцінки частоти становить  $u_f = 0,11$  мГц, де

$$u_{\Delta\phi} = \sqrt{\frac{2}{(-1,871^2 + (-230,1)^2)^2} \left( \frac{100}{4^{12} \cdot 12} + 2,3^2 \right)} = 61,43 \cdot 10^{-6} \text{ рад},$$
$$u_{\Delta t} = 10^{-6} \cdot 1280 \cdot 78,125 \cdot 10^{-6} = 0,1 \text{ мкс}.$$

За результатами модельного експерименту комбінована стандартна невизначеність основної частоти напруги склала 0,11 мГц, що достатньо для практичного застосування.

### **Висновки**

В роботі виконано аналіз невизначеності результату вимірювання частоти основної гармоніки мережевої напруги за використання фазового методу вимірювання. Наведено рівняння вимірювання частоти, подано діаграму Ішикави та бюджет невизначеності. Проілюстровано внесок складових невизначеності в загальну невизначеність шляхом модельного експерименту.

*Ключові слова:* показники якості електроенергії, оцінювання основної частоти напруги, фазовий метод визначення частоти, невизначеність.

### **Література**

- [1] ДСТУ EN 50160:2023. «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності». На заміну EN 50160:2014 ; чинний від 2014-03-01. Вид. офіц. 2023. 32 с.
- [2] E. Gasch, M. Domagk, R. Stiegler and J. Meyer, "Uncertainty Evaluation for the Impact of Measurement Accuracy on Power Quality Parameters," *2017 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS)*, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/AMPS.2017.8078344.
- [3] K. Demerdziev, V. Dimchev. Active power measurement uncertainty modelling and propagation analysis in case of harmonically distorted signals. *Acta IMEKO*, 12(3), 1-10, 2023. doi: 10.21014/actaimeko.v12i3.1463
- [4] Vitalii Babak, Artur Zaporozhets, Mykhailo Kulyk, Yurii Kuts, Leonid Scherbak. «Application of discrete Hilbert transform to estimate the characteristics of cyclic signals: information provision», in book, *Systems, Decision and Control in Energy IV, Springer International Publishing*, 2023, p. 93-115.