

ОСОБЛИВОСТІ РЕАЛІЗАЦІЇ КАЛІБРУВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ КАНАЛІВ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ СИСТЕМ НА МІСЦІ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

*Олег Радченко, слухач магістерського рівня кафедри інформаційно-вимірювальних технологій, Василь Яцук, д.т.н., професор, Андрій Яцик, студент, Національний університет «Львівська політехніка», Україна;
e-mail: oleh.radchenko.mivmv.2023@lpnu.ua*

Анотація

У статті обґрунтовано підхід до реалізації калібрувальних процедур для вимірювальних каналів на місці експлуатації у розподілених кіберфізичних системах. Запропоновано концептуальну модель локальної системи метрологічного нагляду, яка передбачає проведення калібрування з урахуванням реальних умов роботи обладнання. Особливу увагу приділено використанню кодокерованих мір для формування зразкових сигналів і централізованому модулю для дистанційного управління, опрацювання та зберігання даних. Розроблено алгоритм роботи для дистанційного передавання сигналів керування до кодокерованих мір, сприйняття вихідних проміжних кодів перетворення, обчислення та запам'ятовування значень калібрувальних коефіцієнтів у каліброваному вимірювальному каналі. Результати теоретичного аналізу підтверджують можливість досягнення належної точності вимірювань та істотного скорочення витрат часу й ресурсів порівняно з традиційними методами.

Ключові слова

Калібрування, метрологічний нагляд, кодокерована міра, цифровий вимірювач, розподілені системи, вимірювальний канал.

1. Вступ

Вимірювальні канали в промислових системах визначають ефективність і безпеку технологічних процесів. Їхня точність залежить від регулярного калібрування та відповідності встановленим стандартам [1]. У більшості підприємств використовуються традиційні методи калібрування, що передбачають транспортування обладнання до лабораторій для налаштування за еталонними величинами [2]. Такий підхід подовжує калібрувальний цикл, підвищує логістичні витрати та може негативно впливати на точність вимірювань через зміну умов експлуатації.

Сучасні вимоги Індустрії 4.0 зумовлюють необхідність автоматизованих методів метрологічного нагляду, які скорочують простой обладнання та враховують реальні робочі умови [3]. Використання локальної системи метрологічного нагляду сприяє оптимізації цих процесів завдяки застосуванню портативних приладів, що працюють безпосередньо на об'єкті.

Актуальність вимірювальної інформації забезпечує об'єктивний контроль відповідності продукції та виробничих процесів встановленим стандартам якості. Це дозволяє оперативно реагувати на відхилення, мінімізуючи ризики браку та аварійних ситуацій. Регулярне калібрування не лише забезпечує відповідність нормам, а й дає змогу своєчасно виявляти й усувати неточності у вимірюваннях, що підтримує стабільність виробничих процесів.

Попри те, що традиційні методи калібрування забезпечують високу точність налаштування, вони мають значні обмеження, особливо в умовах сучасного виробництва. Головна проблема полягає в їхній невідповідності реальним умовам експлуатації. Калібрування, виконане в лабораторних умовах, не враховує вплив навколишніх факторів, таких як температурні коливання та електромагнітні завади, що характерні для виробничого середовища [4].

2. Недоліки

Одним із суттєвих недоліків традиційних методів калібрування є їхня низька оперативність. Вони виконуються заздалегідь визначеним графіком, що не дозволяє швидко реагувати на зміни умов експлуатації або відхилення у показниках вимірювальних каналів [1]. У результаті підприємства можуть

стикатися з ситуаціями, коли обладнання певний час працює з некоректними параметрами, що може негативно впливати на якість продукції або створювати ризики для виробничого процесу.

Додатковою проблемою є високі витрати на технічне обслуговування та логістику, особливо для великих або віддалених підприємств. Перевезення вимірювальних каналів до лабораторії вимагає значних фінансових і ресурсних витрат на координацію процесу, що знижує загальну ефективність виробництва [5, 6]. Окремо варто відзначити, що у розосереджених вимірювальних системах аналогові або цифрові лінії зв'язку часто не проходять калібрування або їхня перевірка не виконується належним чином [7, 8]. Це ускладнює підтримку їхньої метрологічної надійності та підвищує відповідальність операторів систем.

3. Мета дослідження

Метою роботи є пошук і аналіз можливостей удосконалення дистанційних калібрувальних процедур через використання кодо-керованих мір і централізованого модуля управління. Основна увага зосереджена на забезпеченні належного рівня точності вимірювань, мінімізації впливу людського фактора та скороченні втрат часу у виробничих циклах.

4. Розроблення шляхів реалізації дистанційного калібрування

4.1. Аналіз традиційних методів і визначення недоліків

Традиційні методи калібрування вимірювальних каналів залишаються поширеними завдяки усталеним практикам і регламентам [9]. Проте їхній недолік полягає в затратах часу та ресурсів, що припадають на демонтаж обладнання й організацію лабораторних умов. Внаслідок цього виробничі процеси змушені зупинятися або працювати із застосуванням резервних приладів. Також стандартна процедура не завжди враховує реальний вплив робочих умов, зокрема температуру чи вібрації, які можуть викликати істотні похибки. Окремою проблемою є людський фактор: навіть ретельно регламентовані процедури здатні призводити до неоднакових результатів у різних операторів.

Практика показує, що таке калібрування є прийнятним для окремих етапів контролю якості. Проте в умовах великого виробництва або розподілених кіберфізичних систем неможливо оперативно вирішувати всі метрологічні завдання безпосередньо на підприємстві. Це спонукає до пошуку нових рішень, що враховують специфіку експлуатації обладнання та водночас забезпечують необхідний рівень простежуваності та автоматизації [2].

4.2. Запропонований підхід і розроблена модель

Розроблена концепція локальної системи метрологічного нагляду містить два ключові компоненти. Першим є кодо-керована міра (СМ), яка виконує функцію переносного еталонного модуля. Другим є центральний модуль управління (СМД), що відповідає за координацію процесу, обробку даних і взаємодію з промисловою інфраструктурою.

Кодо-керована міра дає змогу формувати зразкові сигнали різних рівнів безпосередньо на місці експлуатації. У цьому полягає можливість враховувати реальні фактори, зокрема умови довкілля, що впливають на роботу вимірювальних приладів [1]. Після генерування еталонного сигналу СМ зчитує фактичні дані з вимірювального каналу й передає їх у центральний модуль управління. Останній зіставляє отримані значення з еталонними та визначає коригувальні коефіцієнти.

Проведений аналіз свідчить, що впровадження центрального модуля управління забезпечує не тільки збір даних, а й дотримання засад кібербезпеки завдяки сучасним протоколам шифрування і аутентифікації [3]. В архітектурі СМД закладена можливість роботи з великими обсягами інформації в реальному часі, що дозволяє впевнено масштабувати систему в межах розподілених кіберфізичних об'єктів.

4.3. Особливості калібрування з використанням методу зразкових сигналів

Метод зразкових сигналів полягає в послідовному формуванні кількох заданих рівнів напруги (0%, 25%, 50%, 75%, 100% від робочого діапазону) [2]. Такий підхід забезпечує оцінку реальної поведінки вимірювального каналу в заданих точках. Поєднання портативного пристрою (СМ) і високостабільного

джерела зразкових напруг дозволяє відразу визначати відхилення і вираховувати відповідні поправки. У роботі підкреслено важливість інваріантності конструкції СМ до зовнішніх похибок, оскільки навіть мінімальні зміни температури або вологості можуть спричинити порушення балансу в резистивному подільнику. Для нейтралізації таких ефектів пропонується алгоритмічна компенсація, яка виконується центральним модулем управління. Якщо СМ зчитує зразкову напругу у двох режимах (з джерелом опорної напруги та без нього), СМД здатний виділити адитивну складову похибки й компенсувати її в підсумкових результатах.

4.4. Блок-схема системи калібрування

Виконані дослідження підтвердили можливість забезпечення належної точності вимірювання безпосередньо у виробничому середовищі. Передбачувані часові витрати на калібрування зменшуються завдяки відсутності транспортування обладнання, а вплив людського фактора скорочується за рахунок автоматизації процесу. За попередніми оцінками, витрати на одноразове впровадження кодокерованих мір можуть компенсуватися протягом кількох калібрувальних циклів завдяки зменшенню логістичних і часових витрат [10]. Система калібрування складається з кодокерованих мір (СМ), що генерують еталонні сигнали, центрального модуля управління (СМД), який виконує обробку вимірюваних значень і розрахунок коригувальних коефіцієнтів, та інфраструктури зв'язку для передачі даних між компонентами (Рис. 1).

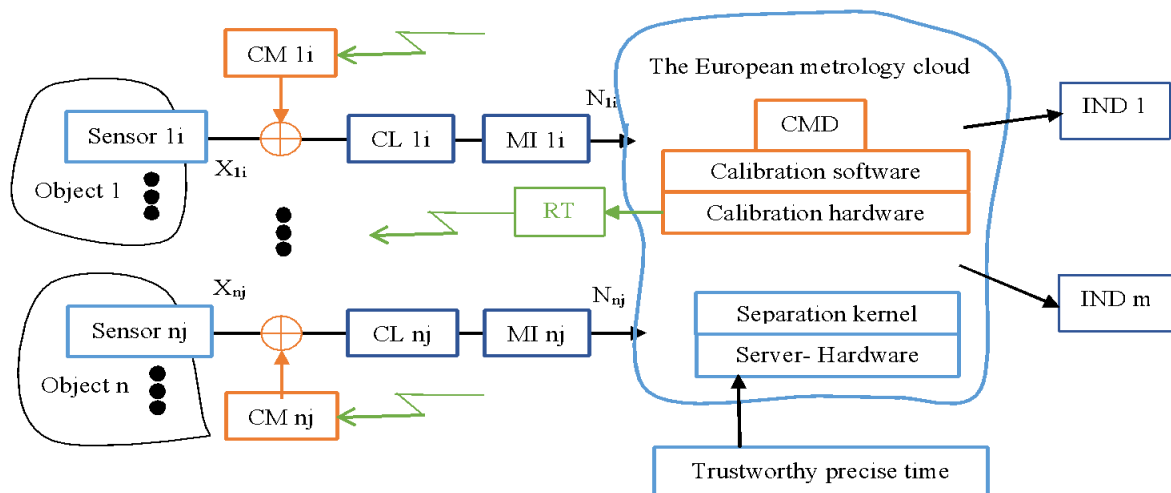


Рис. 1. Блок-схема реалізації калібрування вимірювальних каналів розосереджених систем на місці експлуатації

Система також орієнтована на поступове розширення, тому її можна адаптувати до різних типів вимірювальних каналів, зокрема температурних. Таку модульність забезпечує взаємодія через уніфікований REST API, що дає змогу СМД управляти багатьма СМ одночасно. Центральний модуль (СМД) може легко адаптуватися до збільшення кількості СМ без необхідності суттєвих змін у базовій інфраструктурі. Це дозволяє системі розширюватися відповідно до зростаючих потреб виробництва та інтегрувати нові типи вимірювальних каналів з мінімальними зусиллями. Крім того, централізований контроль забезпечує узгодженість та стандартизацію процесів калібрування, що сприяє підвищенню надійності та точності вимірювань у розподілених кіберфізичних системах.

4.5. Блок-схема алгоритму калібрування

Процес дистанційного калібрування вимірювального каналу починається з ініціалізації СМ, яка у свою чергу уже була попередньо зареєстрована у інформаційній системі локального метрологічного нагляду і отримала унікальний ключ. Також оператор підключив СМ до вимірювального каналу безпосередньо на місці експлуатації. Після ввімкнення кодо-керована міра (СМ) виконує внутрішню самодіагностику, що включає перевірку джерела опорної напруги, резистивного подільника, перемикачів і буферів. Далі СМ підключається до захищеної Wi-Fi мережі, виконує автентифікацію, отримує IP-адресу та перевіряє

готовність до роботи. Відповідно до алгоритму (рис.2) наступний етап передбачає встановлення з'єднання з центральним модулем диспетчеризації (CMD). CM надсилає свій унікальний ідентифікатор і сертифікат автентифікації до CMD, який перевіряє коректність пристрою. Після підтвердження автентичності CMD генерує унікальний ідентифікатор сесії (session_id) для відстеження процесу калібрування. CMD надсилає команду на початок калібрування, а CM підтверджує готовність до роботи. Сформований аналоговий сигнал подається на вхід вимірювального каналу, де він перетворюється через АЦП у цифровий код. Отриманий код фіксується у пам'яті CM. Після завершення вимірювання CM формує пакет із результатами, що включає ідентифікатор сесії, цифровий код, діагностичні дані (наприклад, температура пристрою, стан перемикачів). Пакет передається до CMD, який отримує результати, логує їх і підтверджує успішність вимірювання.

Після збору даних для всіх точок CMD розпочинає обробку. Спочатку визначається адитивна похибка вимірювального каналу на основі даних точки 0%. Далі розраховуються коефіцієнти перетворення для

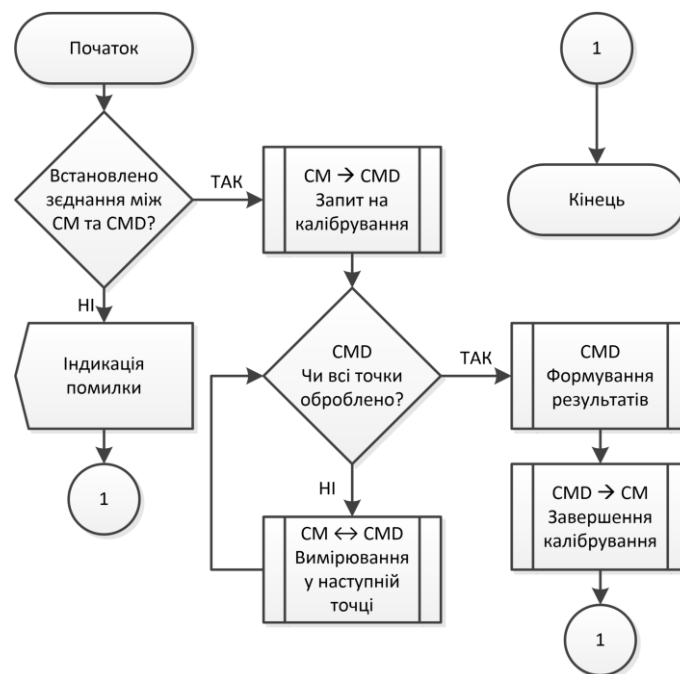


Рис. 2. Спрощена блок-схема алгоритму дистанційного калібрування

кожної точки калібрування, які враховують різницю між номінальними значеннями сигналів та отриманими цифровими кодами. На основі отриманих коефіцієнтів CMD будує передавальну функцію вимірювального каналу.

Після завершення обчислень результати зберігаються в базу даних. CMD генерує цифровий сертифікат, що включає деталі калібрування, передавальну функцію та параметри вимірювального каналу. На завершальному етапі CMD надсилає команду завершення сесії калібрування на CM, після чого CM відновлює початковий стан: розмикає резистивний подільник та готується до відключення від каналу. CMD підтверджує успішне завершення процесу калібрування, завершуючи сесію.

5. Висновки

Запропонована концепція локальної системи метрологічного нагляду ілюструє перспективний шлях для удосконалення калібрування у розподілених кіберфізичних системах. Теоретичний аналіз підтвердив ефективність застосування кодо-керованих мір, що генерують зразкові сигнали на місці, а також центрального модуля управління (CMD), що автоматизує розрахунок та облік коректив. Такий підхід дає змогу зменшити залежність від традиційних лабораторних процедур, мінімізує час простоїв, підвищує простежуваність результатів у реальних умовах експлуатації обладнання, а також автоматизує процес калібрування, що знижує ризики, пов'язані з людським фактором [2].

Впровадження цього рішення потенційно потребує техніко-економічного обґрунтування через початкові

витрати на придбання та інтеграцію системи калібрування (СМ) та центрального модуля управління (СМД) в існуюче виробництво. Утім, довготривалі переваги у вигляді скорочення логістичних витрат, зниження аварійності, точнішого контролю процесів, а також можливість реалізації віддаленого калібрування можуть переважити ці початкові складнощі. Автоматизація процесу дозволяє мінімізувати залучення людини, що, відповідно, знижує ризики помилок та аварій. Подальший розвиток цих ідей передбачає проведення експериментальних досліджень у реальних умовах та масштабування системи для різних галузей промисловості

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що фінансових чи інших потенційних конфліктів щодо цієї роботи немає.

Список використаної літератури

- [1] Bubela, T., Yatsuk, V., Mykyjchuk, M., Kochan, O., & Yatsuk, Yu. (2024). *Ensuring uniformity of measurements in the European Metrology Cloud*. Ukrainian Metrological Journal №1, 11–16. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://doi.org/10.24027/2306-7039.1.2024.300869> (Дата звернення: 10.04.2024).
- [2] Василь Яцук, Юрій Яцук. *Коригування адитивних похибок на місці експлуатації вимірювальних каналів розосереджених систем*. Збірник тез ІВТ-2024. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2024, С. 37–39. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/nov/36513/zbirnyktezkonferenciiivt2024nasayt.pdf> (Дата звернення: 16.11.2024).
- [3] Thiel, F. *Digital transformation of legal metrology - The European Metrology Cloud*. OIML Bulletin, 2018(1), 10–21.
- [4] Yahya, A. E. M., Halaj, M. *Uncertainty and Its Impact on the Quality of Measurement*. American Journal of Engineering and Applied Sciences, 2012, Vol. 5(2), 114–118.
- [5] Закон України "Про метрологію та метрологічну діяльність". Чинний з 2015 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1314-18>. (Дата звернення: 11.09.2024.)
- [6] *Порядок проведення повірки засобів вимірювальної техніки*. Офіційний портал ДП "УКРМЕТРТЕСТСТАНДАРТ". Режим доступу: <https://ukc.gov.ua/knowledge/poryadok-provedennya-povirky-zasobiv-vymiryvalnoyi-tehniky/>. (Дата звернення: 08.10.2024.)
- [7] Василь Яцук, Юрій Яцук. *Забезпечення метрологічної надійності вимірювальних систем у реальному масштабі часу*. Науковий вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Інформаційно-вимірювальні технології, 2019, №80(2), С. 75–77. Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/istcmtm/all-volumes-and-issues/volume-80-no2-2019/providing-metrological-reliability-measuring>. (Дата звернення: 01.11.2024)
- [8] Яцук В.О., Здеб В.Б. *Віддалене коригування похибок багатоканальних кібер-фізичних вимірювальних систем*. Кіберфізичні системи: досягнення та виклики: матеріали І Наукового семінару, 25–26 червня 2015 року, Львів / Національний університет «Львівська політехніка». – Львів: НВФ «Українські технології», 2015. – С. 172–176. Режим доступу: <https://ena.lpnu.ua/items/823311b7-7d84-4b22-a6d5-96624a610987>. (Дата звернення: 05.11.2024)
- [9] ISO/IEC 17025:2017. *Загальні вимоги до компетентності випробувальних і калібрувальних лабораторій*. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=74782 (Дата звернення: 07.05.2024).
- [10] Олег Радченко, Василь Яцук. *Пропозиції щодо управління процесом калібрування вимірювальних каналів на місці експлуатації*. II Міжнародна науково-практична конференція «Інформаційно-вимірювальні технології ІВТ-2024»: Збірник тез, Львів, 2024, С. 37–39. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/attachments/2024/nov/36513/zbirnyktezkonferenciiivt2024nasayt.pdf> (Дата звернення: 17.11.2024).

