

ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ

УДК 621.317

О. М. Васілевський

КОНЦЕПЦІЯ МЕТРОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ІНДУСТРІЇ 4.0

Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця

Анотація. Використання інтелектуальних сенсорів, мережевих технологій, інтернет речей, машинного навчання в Індустрії 4.0 набуває широкого розповсюдження під час проектування та реконструкції технологічних процесів на виробництвах. При цьому виникають нові проблеми, які пов'язані з необхідністю перегляду основних принципів метрологічного забезпечення виробництва, таких як калібрування, оцінювання непевності вимірювань, забезпечення простежуваності, опрацювання великих масивів даних для відтворення і порівняння результатів вимірювань фізичних величин у дистанційному режимі. Традиційні способи калібрування засобів вимірювальної техніки при запровадженні Індустрії 4.0 стають економічно не вигідними під час використання відносно недорогих інтелектуальних сенсорів, а використання складних мережевих технологій разом з машинним навчанням ускладнюють методи попередньої обробки вимірюваних величин. У зв'язку з цим пропонуються нові підходи для вирішення проблеми дистанційного калібрування засобів вимірювань, що використовуються в Індустрії 4.0.

Ключові слова: метрологія 4.0, концепція калібрування, непевність вимірювань, простежуваність, Індустрія 4.0, інтелектуальні датчики.

Аннотация. Использование интеллектуальных сенсоров, сетевых технологий, интернет вещей, машинного обучения в Индустрии 4.0 носит массовое явление при проектировании и реконструкции технологических процессов на производствах. При этом возникают новые проблемы, связанные с необходимостью пересмотра основных принципов метрологического обеспечения производства, таких как калибровка, оценка неопределенности измерений, обеспечение прослеживаемости, обработки больших массивов данных для воспроизведения и сравнения результатов измерений физических величин в дистанционном режиме. Традиционные способы калибровки средств измерительной техники при внедрении Индустрии 4.0 становятся экономически невыгодными при использовании относительно недорогих интеллектуальных датчиков, а использование сложных сетевых технологий вместе с машинным обучением приводят к усложнению методов предварительной обработки измеренных величин. В связи с этим предлагаются новые подходы для решения проблемы дистанционной калибровки средств измерений, используемых в Индустрии 4.0.

Ключевые слова: метрология 4.0, концепция калибровки, неопределенность измерений, прослеживаемость, Индустрия 4.0, интеллектуальные датчики.

Abstract. The use of intelligent sensors, network technologies, the Internet of things, machine learning in Industry 4.0 is a mass phenomenon in the design and reconstruction of technological processes in industries. This raises new problems associated with the need to revise the basic principles of metrological support of production, such as calibration, estimation of measurement uncertainty, ensuring traceability, processing large amounts of data to reproduce and compare the results of measurements of physical quantities in remote mode. The traditional methods of calibrating measuring instruments with the introduction of Industry 4.0 become economically disadvantageous with the use of relatively inexpensive intelligent sensors, and the use of sophisticated network technologies along with machine learning lead to the harder methods of preliminary processing of measured values. In this regard, new approaches are proposed to solve the problem of remote calibration of measuring instruments used in Industry 4.0.

Key words: metrology 4.0, calibration concept, measurement uncertainty, traceability, Industry 4.0, smart sensors.

DOI: <https://doi.org/10.31649/1999-9941-2020-48-2-37-44>.

Вступ

Простежувані калібрування, гармонізоване трактування непевності вимірювань та застосування міжнародних та національних (галузевих) стандартів є основними складовими метрологічної інфраструктури, що дає змогу глобалізувати виробництво та міжнародну торгівлю. Цифровізація технічних засобів та наука про дані швидко змінюють майже всі аспекти концепції калібрування засобів вимірювальної техніки (ЗВТ): наприклад, сенсори стають інтелектуальними, а великі мережі сенсорів та вимірювальних систем використовуються разом з методами машинного навчання для прийняття автоматизованих рішень та контролю виробничих процесів. Поєднання цих та інших технологічних елементів формує майбутню концепцію метрологічного забезпечення в Індустрії 4.0, парадигму, яка швидко поширюється та розвивається у всьому світі.

Ключовим завданням у такому поєднанні методів машинного навчання, інтелектуальних сенсорів, вимірювальних систем та інших технологічних елементів – є достовірність даних, алгоритмів та процесів [1 – 7]. Мова іде про якість даних, яка напряму залежить від наявності концепції непевності вимірювань для підтримки метрологічної інфраструктури [4]. Щоб охопити весь інформаційний потік, така інфраструктура повинна, серед іншого, включати простежуваність калібрування інтелектуальних сенсорів з урахуванням залежних від часу ефектів, метрологічну обробку складних сенсорних мереж та оцінку непевності для агрегування даних та способів прийняття рішень.

Актуальність

Результати цифрової трансформації в метрології та Індустрії 4.0 чітко відображені в розвитку технології смарт-сенсорів (Smart sensor – інтелектуальних сенсорів) [5, 8]. Застосування метрологічних принципів для сенсорних мереж в Індустрії 4.0 призводить до декількох актуальних проблем, пов'язаних

із забезпеченням дистанційного калібрування та простежуваності. Наприклад, впровадження метрології в Індустрію 4.0 означає, що можливості калібрування повинні бути розширені для сенсорів з цифровим вихідним сигналом. Це вимагає нових концепцій щодо генерації часових позначок для сигналів, що надходять від сенсорів. В першу чергу це особливо важливо для динамічного (частотно залежного) калібрування. Причина полягає в тому, що надійне калібрування зміни фази в сигналі, що надходить від сенсора є важливим елементом для залежних від часу вимірюваних величин [9-21]. У типових для Індустрії 4.0 додатках, сенсори забезпечують цифрові, залежні від часу вихідні сигнали та мають внутрішні можливості обробки сигналів. Це, в свою чергу ускладнює калібрування фази сигналу, оскільки внутрішнє вимірювання часу сенсора не керується системою калібрування, що вимагає нових концепцій для калібрування таких сенсорів. Тому актуальним є завдання подальшого розвитку концепції метрологічного забезпечення при збереженні оцінених непевностей вимірювань.

Мета

Мета роботи полягає в розробці концепції дистанційного калібрування вимірювальних каналів та інтелектуальних сенсорів, а також забезпеченні простежуваності результатів вимірювань, отриманих за допомогою сенсорних мереж в Індустрії 4.0.

1. Концепція калібрування та простежуваності в Індустрії 4.0

Одним з варіантів реалізації онлайн калібрування є додаткове використання сигналу GPS для отримання точного значення часу. При підключенні зовнішнього сигналу часу вихідні значення сенсора можна оцифрувати абсолютними, простежуваними значеннями часу. Завдяки доступним таким чином вимірним значенням величин, отриманих від сенсора з простежуваними значеннями часу, сенсор можна динамічно калібрувати з використанням традиційних підходів [20-30], включаючи його фазову характеристику. При використанні сигналу GPS (чи навігаційної системи Galileo), MEMS сенсорів та спеціальної плати мікроконтролера «Smart-Up-Unit», яка може вмістити один або декілька сенсорів MEMS і має можливості підключення до зовнішніх простежуваних таймерів для забезпечення попереднього опрацювання результатів вимірювань в реальному часу, з'являється можливість дистанційного (онлайн) калібрування (рис. 1).

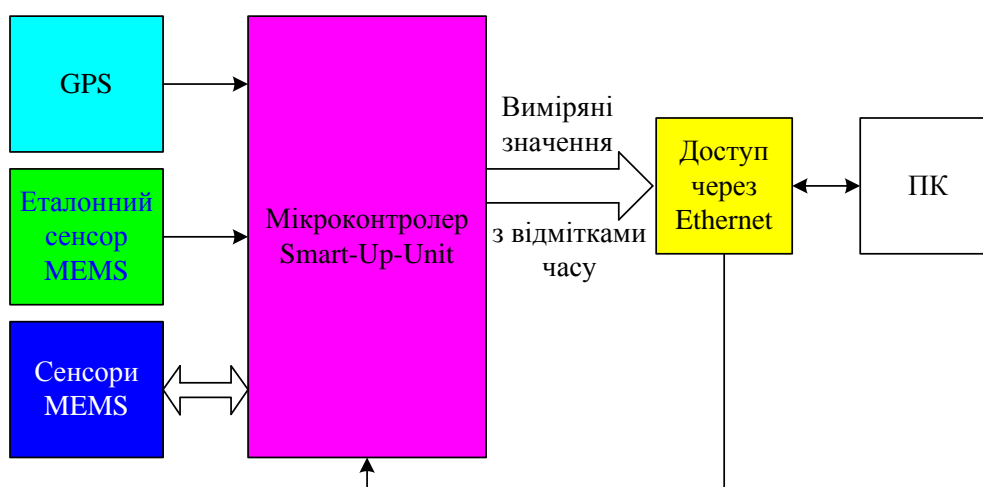


Рисунок 1 – Узагальнена структурна схема інтелектуального засобу вимірювання, що дає змогу реалізувати процедуру калібрування в дистанційному (онлайн) режимі

Відкалібрований таким чином сенсор можна під'єднувати до веб-сервісів, що спрощує інтеграцію в Індустрію 4.0 та до Інтернет речей. Окрім простежуваних відміток часу сигналів сенсорів на платі мікроконтролера можна реалізовувати способи опрацювання результатів досліджень, які зможуть забезпечити оцінку непевності вимірювання для кожного поточного вимірюваного значення. Таким чином, основні принципи опрацювання вимірних значень можуть бути інтегровані безпосередньо на розширеному сенсорі з платою мікроконтролера або реалізовані на персональному комп'ютері (ПК), що знаходиться недалеко від сенсора. Паралельно з цим математичні методи аналізу результатів вимірювань повинні бути представленими (поданими) таким чином, щоб їх можна було застосувати в режимі онлайн під час реалізації процедури вимірювань (при збиранні даних). З цією метою використовувані методи опрацювання даних та сигналів повинні бути доповнені способами оцінювання непевностей вимірю-

вань. Важливим для практичного використання є модульна структура реалізації, щоб її можна було гнучко застосовувати до багатьох галузей використання.

Крім розширення можливостей обладнання для калібрування, необхідно розробити підходи до аналізу методів попереднього опрацювання сигналів, інтегрованих у сенсор. Як правило, ці методи не будуть відомі калібрувальній лабораторії. Формально знання методів опрацювання сигналів, що використовуються в сенсорі, не є необхідним для виконання калібрування. На практиці, врахування методів опрацювання сигналів під час калібрування можуть призвести до сильних нелінійних ефектів. Наприклад, алгоритм уникнення стрибків сигналу сенсора шляхом згладжування може призвести до нелінійної поведінки сенсора при ударному калібруванні. Таким чином, раніше лінійно-реагуючий сенсор стає нелінійним вимірювальним перетворювачем через використовуване програмне забезпечення, і результат калібрування може більше не відображати реальну поведінку вимірювального перетворювача на практиці. Як результат, методика калібрування має бути переглянута. Однак для цього спочатку потрібно буде провести глибокі фундаментальні дослідження та встановлення затверджених типів методів попереднього опрацювання сигналів. Необхідно переконатися, що методи та алгоритми, інтегровані у засіб вимірювання, не можуть призвести до неправильного оцінювання метрологічної справності та точності в результаті калібрування. Просте розкриття алгоритмів, ймовірно, недостатньо для цієї мети, оскільки складність відповідних процедур швидко зростає. Зокрема, якщо методи машинного навчання мають бути інтегровані у засоби вимірювання, звичайний аналіз алгоритму, не дасть надійних тверджень щодо оцінки непевності результату калібрування. Однак без правильного калібрування з оціненою непевністю, результат вимірювання не буде простежуватися до одиниць SI. В якості альтернативи, можуть бути розроблені цільові підходи, які реалізують визнані методи оцінювання результатів вимірювань, включаючи оцінку непевності вимірювань безпосередньо біля сенсора. Це дасть змогу створювати інтелектуальні засоби вимірювання (ЗВ), що мають простежуваність величин до одиниць SI, досягнуту калібруванням, з інтелектуальним попереднім опрацюванням результатів у ЗВ. Це означає, наприклад, що результати калібрування також реалізуються безпосередньо у ЗВ у вигляді способів компенсації динамічних ефектів сенсора. Результатом такого поєднання може стати принцип "розумної простежуваності". Таким чином, виробники можуть задовільнити бажання клієнтів у інтелектуальних сенсорах, і в той же час застосування способів опрацювання результатів вимірювань, визнаних у метрології, може бути спрощене. При цьому можна використовувати новітні розробки, наприклад, такі як сертифікат цифрового калібрування (DCC) [31].

Ще однією задачею при застосуванні принципів метрології в Індустрії 4.0 є необхідність реалізації економічно ефективного простежуваного калібрування сенсорів MEMS для приписування надійних значень непевностей вимірювань на виході сенсорів. Сенсори MEMS дуже економічні і можуть бути легко інтегровані в існуючі вимірювальні системи у великих кількостях. Принцип "великий, але поганий (big but bad)" спрямований на використання багатьох вимірювальних приладів для компенсації поганих (незадовільних) метрологічних характеристик окремих сенсорів. Зазвичай це ґрунтується на припущенні, що завдяки вмілому використанню інтелектуальних способів оцінювання, шаблони (модель) результатів вимірювань можуть використовуватися так само, як результати вимірювань від окремих еталонних сенсорів. Однак реальна перевірка такої пропозиції, а також встановлення співставлення вимірювань на інших об'єктах можливі лише з урахуванням непевностей вимірювань та простежуваності до одиниць SI. При цьому існуючі методи калібрування зазвичай занадто складні і дорогі для сенсорів MEMS. Тому одним із підходів є впровадження методів пакетного калібрування, де кілька сенсорів калібруються одночасно для економії часу та грошей. Такі процедури вже регулярно використовуються під час кінцевої перевірки працездатності сенсорів MEMS та при їх автоматизованому тестуванні. Для цього використовуються калібровані еталонні сенсори, які встановлюються на об'єкті. Тоді сенсори, які потрібно контролювати можуть бути відкалібровані безпосередньо на об'єкті на основі запропонованої вище концепції використання спеціалізованого мікроконтролера із сенсорами MEMS та сигналу GPS (див. рис. 1). Таким чином, за допомогою математично-статистичних методів усі змонтовані сенсори MEMS можуть бути відкалібровані одночасно. Така процедура називається калібруванням в один дотик.

Індустрія 4.0 також характеризується широким використанням цифрових сенсорів і їх мереж, які забезпечують потік даних для цілей автоматичного моніторингу, прогнозування і контролю. В даному контексті часто згадуються ключові слова: «профілактичне обслуговування» або «моніторинг стану». Використання таких методів для профілактичного обслуговування не є новим і вже давно практикується в різних підходах. Однак в Індустрії 4.0 такі концепції швидко розвиваються, поєднуючи більш складні математично-статистичні методи або використовуючи великі розподілені сенсорні мережі [8].

Методи оцінювання результатів вимірювань і представлення непевностей вимірювань, які застосовуються сьогодні в стандарті [32], були розроблені в той час, коли розвиток Індустрії 4.0 ще не був очікуваним. Керівництво по вираженню непевності у вимірюваннях (GUM) [33] і його доповнення - Додаток 1 [34] і Додаток 2 [35], можуть застосовуватись до сенсорних мереж і технології інтелектуальних засобів вимірювань. Однак не вистачає практичних прикладів і інструкцій щодо їх застосування саме для

сенсорних мереж. Тому потрібно розширювати існуючі методи для опрацювання непевностей вимірювань в сенсорних мережах, наприклад, для вирішення проблем мережевого зв'язку, з огляду на конкретні вимоги, такі як специфічні властивості окремих сенсорів і аналіз даних в режимі реального часу для прийняття рішень. З цьєю метою методи оцінювання окремих сенсорів об'єднуються в мережі для агрегованих або розподілених вимірювань. Використовуючи надлишкову інформацію в мережі, можна застосовувати нові концепції, такі як спільне онлайн калібрування сенсорів і екстраполяція інформації щодо результатів калібрування від одних сенсорів до інших аналогічних сенсорів. Але не всі ці аспекти зазвичай можуть виникати в конкретній сенсорній мережі одночасно. Проте, разом методи утворюють комплексний набір інструментів для опрацювання непевностей вимірювань в сенсорних мережах. Це означає, що на практиці має бути забезпечено ефективне використання комбінації окремих методів (підходів) в залежності від їх застосування. Тому необхідно об'єднувати усі можливі методи опрацювання в математичні структури. Математична структура - це більше, ніж просто набір математичних методів та програмного забезпечення, вона забезпечує послідовний підхід до вирішення проблем, що відносяться до конкретних об'єктів актуальних для промислових сенсорних мереж або наукової галузі.

Гнучке використання розроблених підходів (методів) на практиці дуже корисно для ефективного їх застосування. Тому для Індустрії 4.0 необхідно розробляти так звану багатоагентну систему, в якій кожен сенсор представлений програмним модулем, що називається «Сенсорним агентом» [36]. Такий модуль містить всю необхідну інформацію про сенсор, а також його конкретні способи опрацювання і властивості для оцінювання результатів вимірювань (рис. 2). Наприклад, відкалібрований п'єзоелектричний сенсор може бути представлений сенсорним агентом (програмним модулем), який містить повні калібрувальні дані, а також методи розрахунку вимірюваного значення (в даному випадку віброприскорення) і пов'язаної з ним непевності в будь-який момент часу. Цей розрахунок може також включати більш складні методи, такі як фільтрація або деконволюції [23].

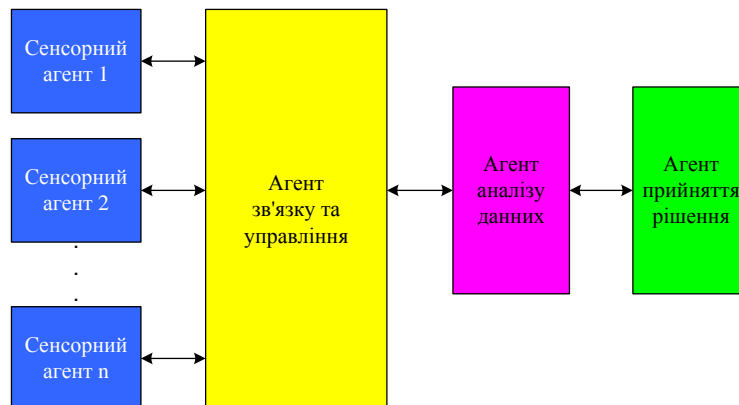


Рисунок 2 – Структура мультиагентної системи оцінювання результатів вимірювань, що відображає головну ідею Індустрії 4.0

Передача даних від сенсора здійснюється так званим «Агентом зв'язку та управління» (рис. 2). Цей агент передає дані від сенсорних агентів та забезпечує інтерфейс між сенсорною мережею (представленою сукупністю «Сенсорних агентів»). «Агент аналізу даних» вміщує вищезгадані методи опрацювання, що використовують інформацію отриману від «Агента зв'язку та управління». Крім того, «Агент аналізу даних» може використовуватися для класифікації, розпізнавання образів або інших завдань на основі агрегованих даних. І на кінець, «Агент прийняття рішення» повідомляє висновок, який автоматично формується на основі результатів аналізу даних (рис. 2). Така гнучка структура для оцінювання результатів вимірювань відображає основну ідею метрологічного забезпечення в Індустрії 4.0 для гнучких і в значній мірі автономних сенсорних мереж. Такий тип реалізації концепції метрологічного забезпечення в Індустрії 4.0 також дозволяє переналаштувати топологію мережі під час її роботи.

Висновки

Виробництво майбутнього відповідно до концепції Індустрії 4.0 багато в чому базується на мережевій сенсорній технології та інтелектуальних методах оцінювання. Тому концепції, процедури та стандарти для метрології в гетерогенних сенсорних мережах необхідні для відповідної метрологічної інфраструктури. Необхідно враховувати весь життєвий цикл даних - від вимірювального приладу до прийняття рішення, заснованого на цих даних.

Простежуване калібрування інтелектуальних засобів вимірювання є основою для кожного точного вимірювання, саме тому результати вимірювань будуть надійними і їх можна буде порівнювати та відт-

ворювати. Розвиток основних метрологічних досліджень в останні десятиліття загалом зосереджувався на підвищенні точності вимірювань, нових вимірюваних величинах та нових принципах вимірювання. Однак, при більшій інтеграції цифрових технологій у засоби вимірювання, швидко зростаючому використанні сенсорних мереж та тенденції до інтегрованої попередньої обробки в так званих "інтелектуальних сенсорах" необхідні абсолютно нові підходи до розробки методик (процедур) калібрування. Наприклад, недорогі сенсори MEMS доступні в надзвичайно великих кількостях і роблять традиційні підходи до калібрування економічно не вигідними; цифрові вихідні сигнали більше не дозволяють розділяти сенсор і попередню обробку для калібрування; вбудовані системи значно ускладнюють методи попереднього опрацювання результатів вимірювань. У зв'язку з цим, на найближче десятиліття відкриваються абсолютно нові галузі досліджень і розробок в метрології. Сенсорна мережа - це не лише просторово розподілена система, а загалом мережа з декількох сенсорних елементів. Наприклад, це може бути єдиний інтелектуальний сенсор, який визначає параметри навколишнього середовища за допомогою відповідних вимірювальних перетворювачів. Синтез інформації з декількох джерел не є рідкістю та існують відповідні процедури їх опрацювання. При цьому розгляд непевності вимірювання зазвичай не відповідає принципам метрології [33], але переслідує такі стратегії, як надійний контроль чи оцінка, як, наприклад, у [6, 28, 29, 37]. Поєднання таких розробок з принципами GUM та його методологією вимагає фундаментальних досліджень орієнтованих на застосування додатків керівництва GUM [34, 35], але для цього потрібні гнучкі програмні рішення. Це означає зміну парадигми для більшості метрологічних науково-дослідних інститутів.

Список літератури

- [1] W. Bauer, B. Dworschak, H. Zaiser, «Weiterbildung und Kompetenzentwicklung für die Industrie 4.0», *Handbuch Industrie 4.0*, Bd.1, pp. 125-138, 2017.
- [2] О. М. Васілевський, В. О. Поджаренко, *Актуальні проблеми метрологічного забезпечення: [навчальний посібник]*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2010, 214 с.
- [3] D. Spath, B. Dworschak, H. Zaiser, D. Kremer, «Kompetenzentwicklung in der Industrie 4.0», *Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt*, pp. 113-124, 2015.
- [4] О. М. Васілевський, В. Ю. Кучерук, С. Т. Володарський, *Непевність результатів вимірювань, контролю та випробувань: [підручник]*. Херсон, Україна: «ОЛДІ-ПЛЮС», 2020, 352 с.
- [5] H. Minssen, «Industrie 4.0», *Fortsetzung folgt*. Springer VS, Wiesbaden, pp. 117-135, 2017.
- [6] В. О. Поджаренко, В. М. Дідич, О. М. Васілевський, «Оцінка вірогідності автоматизованого контролю складових елементів гумусу в ґрунті», *Вісник національного університету «Львівська політехніка». Серія: «Автоматика, вимірювання та керування»*, № 639, с. 51-54, 2009.
- [7] B. Dworschak, H. Zaiser, «Kompetenzentwicklung in und für die Industrie 4.0 - ein Konzept», *Industrie 4.0: Risiken und Chancen für die Berufsbildung*, 44, pp. 261-278, 2017.
- [8] A. Schütze, N. Helwig, «Sensorik und Messtechnik für die Industrie 4.0», *Technisches Messen*, № 84 (5), pp. 310-319, 2017.
- [9] V. Wilkens, C. Koch, «Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference», *JASA*, 115 (6), pp. 2892-12, 2004.
- [10] O. Vasilevskyi, P. Kulakov, D. Kompanets, O. Lysenko, V. Prysyzhnyuk, W. Wójcik, D. Baitussupov, «A new approach to assessing the dynamic uncertainty of measuring devices», *Proceedings Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 2018, 108082E.
- [11] L. Windelband, «Work requirements and qualifications in maintenance 4.0», *Advances in Ergonomic Design of Systems, Products and Processes*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 89-102, 2017.
- [12] O. M. Vasilevskyi, P. I. Kulakov, K. V. Ovchynnykov, V. M. Didych, «Evaluation of dynamic measurement uncertainty in the time domain in the application to high speed rotating machinery», *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, Vol. 8, Article Number 25, 2017.
- [13] A. Link, A. Täubner, W. Wabinski, T. Bruns, C. Elster, «Calibration of accelerometers: determination of amplitude and phase response upon shock excitation», *Meas. Sc. Technol.*, 17 (7), 1888, 2006.
- [14] C. Elster, A. Link, «Uncertainty evaluation for dynamic measurements modelled by a linear time-invariant system», *Metrologia*, 45 (4), pp. 464-473, 2008.
- [15] O. M. Vasilevskyi, V. M. Didych, «The method of expressing the uncertainty of dynamic measurements», *Modern engineering research: topical problems, challenges and modernity: Collective monograph*. Riga, Latvia: Izdevniecība «Baltija Publishing», 2020, pp. 63-83.
- [16] P. Hale, A. Dienstfrey, J. Wang, D. Williams, A. Lewandowski, D. Keenan, T. Clement, «Traceable Waveform Calibration With a Covariance-Based Uncertainty Analysis», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 58(10), pp. 3554-3568, 2009.
- [17] O. M. Vasilevskyi, P. I. Kulakov, I. A. Dudatiev, V. M. Didych, A. Kotyra, B. Suleimenov, A. Assembay, A. Kozbekova, «Vibration diagnostic system for evaluation of state interconnected electrical

- motors mechanical parameters», *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017*, 2017, 104456C.
- [18] P. Ittermann, J. Niehaus, «Industrie 4.0 und wandel von Industriearbeit–revisited. Forschungsstand und Trendbestimmungen», *Digitalisierung industrieller Arbeit*, pp. 33-60, 2018.
- [19] O. M. Vasilevskyi, «Means for measuring the dynamic torque electric motors and an analysis of its accuracy», *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*, 73, pp. 52–56, 2012.
- [20] V. O. Podzharenko, O. M. Vasilevskyi, «Diagnostics of technical condition of electromechanical systems for the logarithmic decrement», *Proceedings of Donetsk National Technical University*, 88, pp. 138–144, 2005.
- [21] M. Kobusch, S. Eichstädt, «A case study in model-based dynamic calibration of small strain gauge force transducers», *АСТА ІМЕКО*, vol. 6(1), pp. 3-12, 2017.
- [22] O. M. Васілевський, «Алгоритм оцінювання невизначеності у вимірюваннях при виконанні метрологічних робіт», *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*, № 3 (7), с. 147-151, 2006.
- [23] A. Link, C. Elster, «Uncertainty evaluation for IIR (infinite impulse response) filtering using a state-space approach», *Meas. Sci. Technol.*, 20 (5), pp. 055104-6, 2009.
- [24] O. M. Васілевський, «Методика визначення міжповірного інтервалу засобів вимірювання на основі концепції невизначеності», *Технічна електродинаміка*, № 6, с. 81-88, 2014.
- [25] L. Windelband, B. Dworschak, «Arbeit und Kompetenzen in der Industrie 4.0. Anwendungsszenarien Instandhaltung und Leichtbaurobotik», *Digitalisierung industrieller Arbeit*, pp. 61-80, 2018.
- [26] O. M. Васілевський, «Оцінка невизначеності вихідних сигналів засобів вимірювальної техніки в динамічних режимах роботи», *Системи обробки інформації*, № 4 (85), с. 81-84, 2010.
- [27] S. Eichstädt, V. Wilkens, «GUM2DFT - a software tool for uncertainty evaluation of transient signals in the frequency domain», *Meas. Sci. Technol.*, 27(5), 055001, 2016.
- [28] O. M. Васілевський, «Нормування показників метрологічної надійності», *Вісник Вінницького політехнічного інституту*, № 4, с. 9-13, 2011.
- [29] O. M. Васілевський, П. І. Кулаков, *Елементи теорії підвищення точності вимірювання та синхронізації кутових швидкостей роторів взаємозв'язаних електромоторів: монографія*. Вінниця, Україна: ВНТУ, 2011, 176 с.
- [30] П. М. Сопрунок, А. Н. Василевский, Ю. А. Чабанюк, «Неопределенность результатов измерений при контроле асинхронности вращения электромеханических преобразователей», *Системи обробки інформації*, №7 (56), с. 72-75, 2006.
- [31] S. Hackel, F. Härtig, J. Hornig, T. Wiedenhöfer, «The Digital Calibration Certificate», *PTB – Mitteilungen*, 127 (4), pp. 75-81, 2017.
- [32] Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995): ISO/IEC GUIDE 98-3:2008. – ISO, Switzerland, 2008, 120 p.
- [33] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100:2008. – Sevres : JCGM, 2008, 120 p.
- [34] Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Propagation of distributions using a Monte Carlo method: JCGM 101:2008. – Sevres: JCGM, 2008, 82 p.
- [35] Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Extension to any number of output quantities : JCGM 102:2011. – Sevres: JCGM, 2011, 72 p.
- [36] B. Young, A. Brintrup, «Multi Agent System for Machine Learning Under Uncertainty in Cyber Physical Manufacturing System», in *Proc. of 9th Workshop on Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, Spain, 2019, pp. 236-239.
- [37] Y. Xia, J. Han, «Robust Kalman filtering for systems under norm bounded uncertainties in all system matrices and error covariance constraints», *J. System Sci. and Complexity*, 18 (4), pp. 439-444, 2005.
- Стаття надійшла: 19.06.2020.

References

- [1] W. Bauer, B. Dworschak, H. Zaiser, «Weiterbildung und Kompetenzentwicklung für die Industrie 4.0», *Handbuch Industrie 4.0*, Bd.1, pp. 125-138, 2017.
- [2] O. M. Vasilevskyi, V. O. Podzharenko, *Aktualni problemy metrolohichnoho zabezpechennia: [navchalnyi posibnyk]*. Vinnytsia, Ukraina: VNTU, 2010, 214 s.
- [3] D. Spath, B. Dworschak, H. Zaiser, D. Kremer, «Kompetenzentwicklung in der Industrie 4.0», *Lehren und Lernen für die moderne Arbeitswelt*, pp. 113-124, 2015.
- [4] O. M. Vasilevskyi, V. Yu. Kucheruk, Ye. T. Volodarskyi, *Nepevnist rezultativ vymiriuvan, kontroliu ta vyprobuvan: [pidruchnyk]*. Kherson, Ukraina: «OLDI-PLIUS», 2020, 352 s.

- [5] H. Minssen, «Industrie 4.0», *Fortsetzung folgt*. Springer VS, Wiesbaden, pp. 117-135, 2017.
- [6] V. O. Podzharenko, V. M. Didych, O. M. Vasilevskiy, «Otsinka virohidnosti avtomatyzovanoho kontroliu skladovykh elementiv humusu v grunti», *Visnyk natsionalnoho universytetu «Lvivska politekhnika»*. Seriya: «Avtomatyka, vymiriuvannia ta keruvannia», № 639, s. 51-54, 2009.
- [7] B. Dworschak, H. Zaiser, «Kompetenzentwicklung in und für die Industrie 4.0 – ein Konzept», *Industrie 4.0: Risiken und Chancen für die Berufsbildung*, 44, pp. 261-278, 2017.
- [8] A. Schütze, N. Helwig, «Sensorik und Messtechnik für die Industrie 4.0», *Technisches Messen*, № 84 (5), pp. 310-319, 2017.
- [9] V. Wilkens, C. Koch, «Amplitude and phase calibration of hydrophones up to 70 MHz using broadband pulse excitation and an optical reference», *JASA*, 115 (6), pp. 2892-12, 2004.
- [10] O. Vasilevskiy, P. Kulakov, D. Kompanets, O. Lysenko, V. Prisyazhnyuk, W. Wójcik, D. Baitussupov, «A new approach to assessing the dynamic uncertainty of measuring devices», *Proceedings Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018*, 2018, 108082E.
- [11] L. Windelband, «Work requirements and qualifications in maintenance 4.0», *Advances in Ergonomic Design of Systems, Products and Processes*. Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 89-102, 2017.
- [12] O. M. Vasilevskiy, P. I. Kulakov, K. V. Ovchynnykov, V. M. Didych, «Evaluation of dynamic measurement uncertainty in the time domain in the application to high speed rotating machinery», *International Journal of Metrology and Quality Engineering*, Vol. 8, Article Number 25, 2017.
- [13] A. Link, A. Täubner, W. Wabinski, T. Bruns, C. Elster, «Calibration of accelerometers: determination of amplitude and phase response upon shock excitation», *Meas. Sc. Technol.*, 17 (7), 1888, 2006.
- [14] C. Elster, A. Link, «Uncertainty evaluation for dynamic measurements modelled by a linear time-invariant system», *Metrologia*, 45 (4), pp. 464-473, 2008.
- [15] O. M. Vasilevskiy, V. M. Didych, «The method of expressing the uncertainty of dynamic measurements», *Modern engineering research: topical problems, challenges and modernity: Collective monograph*. Riga, Latvia: Izdevnieciba «Baltija Publishing», 2020, pp. 63-83.
- [16] P. Hale, A. Dienstfrey, J. Wang, D. Williams, A. Lewandowski, D. Keenan, T. Clement, «Traceable Waveform Calibration With a Covariance-Based Uncertainty Analysis», *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 58(10), pp. 3554-3568, 2009.
- [17] O. M. Vasilevskiy, P. I. Kulakov, I. A. Dudatiev, V. M. Didych, A. Kotyra, B. Suleimenov, A. Assembay, A. Kozbekova, «Vibration diagnostic system for evaluation of state interconnected electrical motors mechanical parameters», *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments 2017*, 2017, 104456C.
- [18] P. Ittermann, J. Niehaus, «Industrie 4.0 und wandel von Industriearbeit – revisited. Forschungsstand und Trendbestimmungen», *Digitalisierung industrieller Arbeit*, pp. 33-60, 2018.
- [19] O. M. Vasilevskiy, «Means for measuring the dynamic torque electric motors and an analysis of its accuracy», *Vymiriuvalna tekhnika ta metrolohiia*, 73, pp. 52-56, 2012.
- [20] V. O. Podzharenko, O. M. Vasilevskiy, «Diagnostics of technical condition of electromechanical systems for the logarithmic decrement», *Proceedings of Donetsk National Technical University*, 88, pp. 138-144, 2005.
- [21] M. Kobusch, S. Eichstädt, «A case study in model-based dynamic calibration of small strain gauge force transducers», *ACTA IMEKO*, vol. 6(1), pp. 3-12, 2017.
- [22] O. M. Vasilevskiy, «Alhorytm otsiniuvannia nevyznachenosti u vymiriuvanniakh pry vykonanni metrolohichnykh robot», *Informatsiini tekhnologii ta kompiuterna inzheneriia*, № 3 (7), s. 147-151, 2006.
- [23] A. Link, C. Elster, «Uncertainty evaluation for IIR (infinite impulse response) filtering using a state-space approach», *Meas. Sci. Technol.*, 20 (5), pp. 055104-6, 2009.
- [24] O. M. Vasilevskiy, «Metodyka vyznachennia mizhpovirochnoho intervalu zasobiv vymiriuvannia na osnovi kontseptsii nevyznachenosti», *Tekhnichna elektrodynamika*, № 6, s. 81-88, 2014.
- [25] L. Windelband, B. Dworschak, «Arbeit und Kompetenzen in der Industrie 4.0. Anwendungsszenarien Instandhaltung und Leichtbaurobotik», *Digitalisierung industrieller Arbeit*, pp. 61-80, 2018.
- [26] O. M. Vasilevskiy, «Otsinka nevyznachenosti vykhidnykh syhnaliv zasobiv vymiriuvanoi tekhniki v dynamichnykh rezhymakh roboty», *Systemy obrobky informatsii*, № 4 (85), s. 81-84, 2010.
- [27] S. Eichstädt, V. Wilkens, «GUM2DFT - a software tool for uncertainty evaluation of transient signals in the frequency domain», *Meas. Sci. Technol.*, 27(5), 055001, 2016.
- [28] O. M. Vasilevskiy, «Normuvannia pokaznykiv metrolohichnoi nadiinosti», *Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu*, № 4, s. 9-13, 2011.
- [29] O. M. Vasilevskiy, P. I. Kulakov, *Elementy teorii pidvyshchennia tochnosti vymiriuvannia ta synkhronizatsii kutovykh shvydkostei rotoriv vzaïmozv'iazanykh elektromotoriv: monohrafiia*. Vinnytsia, Ukraina: VNTU, 2011, 176 s.

- [30] P. M. Sopruniuk, A. N. Vasylevskyi, Yu. A. Chabaniuk, «Neopredelennost rezultatov yzmereniya pry kontrole asynkhronnosti vrashcheniya elektromekhanicheskikh preobrazovatelei», *Systemy obrobky informatsii*, №7 (56), s. 72-75, 2006.
- [31] S. Hackel, F. Härtig, J. Hornig, T. Wiedenhöfer, «The Digital Calibration Certificate», *PTB – Mitteilungen*, 127 (4), pp. 75-81, 2017.
- [32] Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995): ISO/IEC GUIDE 98-3:2008. – ISO, Switzerland, 2008, 120 p.
- [33] Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement: JCGM 100:2008. – Sevres : JCGM, 2008, 120 p.
- [34] Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Propagation of distributions using a Monte Carlo method: JCGM 101:2008. – Sevres: JCGM, 2008, 82 p.
- [35] Evaluation of measurement data – Supplement 2 to the «Guide to the expression of uncertainty in measurement» – Extension to any number of output quantities : JCGM 102:2011. – Sevres: JCGM, 2011, 72 p.
- [36] B. Young, A. Brintrup, «Multi Agent System for Machine Learning Under Uncertainty in Cyber Physical Manufacturing System», in *Proc. of 9th Workshop on Service Oriented, Holonic and Multi-agent Manufacturing Systems for Industry of the Future*, Spain, 2019, pp. 236-239.
- [37] Y. Xia, J. Han, «Robust Kalman filtering for systems under norm bounded uncertainties in all system matrices and error covariance constraints», *J. System Sci. and Complexity*, 18 (4), pp. 439-444, 2005.

Відомості про авторів

Васілевський Олександр Миколайович – доктор технічних наук, професор, Перший проректор з науково-педагогічної роботи з організації навчального процесу та його науково-методичного забезпечення Вінницького національного технічного університету.

А. Н. Василевский

**КОНЦЕПЦИЯ МЕТРОЛОГИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ В
ИНДУСТРИИ 4.0**

Винницкий национальный технический университет, Винница

О. М. Vasilevskyi

**THE CONCEPT OF METROLOGICAL EQUIPMENT IN
INDUSTRY 4.0**

Vinnitsia National Technical University, Vinnitsya